Д-ръ Густавъ Бенишке

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ТРЕХФАЗНАГО ТОКА,

ихъ дѣйствіе, испытаніе и расчетъ.

Переводъ съ нѣмецкаго изданія, пересмотрѣннаго
и исправленнаго авторомъ,
студентовъ СПБ. Политехнич. Институте
Голмица **и** ***Сухарева,***

подъ редакціей преподавателя СПБ. Политехнич. Института
инж.-элек. **Г. А. ЮСТА.**

Съ 113 фигурами въ текстѣ.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Типографія „Печатный Трудъ", Прачешный пер., 4, уголъ Мойки.
1912.

Предисловіе автора.

Настоящая книга содержитъ теорію индукціонныхъ двигателей трехфазнаго тока, безъ углубленія въ ея детали. Вслѣдствіе этого удалось отвести больше мѣста разсмотрѣнію условій работы и испытанію машинъ, въ то время какъ вопросы второстепенные, какъ напр. выводъ коэффиціентовъ обмотки, опущены совершенно. Сдѣлано это потому, что на тысячу инженеровъ, имѣющихъ дѣло съ двигателями трехфазнаго тока, едва встрѣчается одинъ, для котораго этотъ выводъ представлялъ бы интересъ. Поэтому коэффиціенты эти просто даются готовыми (стр. 112). Для лицъ, интересующихся ихъ выводомъ, можно указать на книгу B. de la Tour'a: „Moteur asynchrones" (Paris 1902) или Heubach'a: „Der Drehstrommotor" (Berlin 1903), хотя съ введеніемъ многихъ коэффиціентовъ, встрѣчающихся въ послѣдней книгѣ, я не согласенъ. Расчетъ двигателя затронутъ настолько, насколько онъ становится необходимымъ для опредѣленія нѣкоторыхъ величинъ, которыя невозможно получить непосредственно изъ опыта, и посколько это необходимо для расчета двигателя новаго типа. Ради полноты въ послѣдней главѣ приведенъ также ходъ вполнѣ независимаго расчета двигателя, хотя вообще едва ли кому-либо придется производить расчетъ, совершенно не пользуясь данными другихъ готовыхъ двигателей. Во всякомъ случаѣ такой расчетъ могъ бы быть произведенъ лишь тѣмъ, кто имѣетъ обширный опытъ какъ по испытанію, такъ и по расчету двигателей. При помощи книжной или устной передачи этого достигнуть нельзя. Для русскаго перевода, послѣдовавшаго съ моего согласія, я произвелъ нѣкоторыя сокращенія и дополненія, которыя войдутъ также въ слѣдующее нѣмецкое изданіе моей книги.

Берлинъ, Августъ 1911 года.

Предисловіе къ русскому изданію.

Въ русской литературѣ по вопросу объ асинхронныхъ двигателяхъ трехфазнаго тока не имѣется ни одной печатной книги, между тѣмъ двигатели этого рода получили столь широкое распространеніе, что изучать дѣйствіе ихъ приходится весьма обширному кругу техниковъ.

Изъ всѣхъ книгъ на иностранныхъ языкахъ этому условію наиболѣе удовлетворяетъ, по нашему мнѣнію, книга Г. Бенишке, написанная на нѣмецкомъ языкѣ.

Однако изъ лицъ, интересующихся асинхронными двигателями, нѣмецкимъ языкомъ владѣетъ относительно небольшое количество, а потому переводъ этой книги на русскій языкъ представляется весьма желательнымъ.

Авторъ былъ настолько любезенъ, что предоставилъ переводчикамъ свой трудъ въ переработанномъ, для предполагаемаго второго нѣмецкаго изданія, видѣ.

Г. Люстъ.

Декабрь, 1911.

Оглавленіе.

Д-ръ Густавъ Бенишке.

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

ТРЕХФАЗНАГО ТОКА.

Введеніе.

1. Основные законы.

При изложеніи этой книги мы будемъ предполагать вездѣ, гдѣ это не оговорено особо, синусоидальную форму кривой тока, эл.-дв. с. и магнитныхъ полей; такъ напр. токъ

$$i = I \sin \omega t,$$

гдѣ $\omega = 2\pi c$, причемъ c есть число періодовъ тока.

Мгновенныя значенія будемъ обозначать малыми буквами (i, e, z), амплитуды—заглавными буквами I, E, Φ, L, а дѣйствующія значенія курсивными латинскими буквами ($\mathfrak{J}$, $\mathfrak{E}$ и т. д.).

При изложеніи предполагаются извѣстными слѣдующіе основные законы: соотношеніе между амплитудой и дѣйствующимъ значеніемъ; напр.,

$$\mathfrak{J} = \frac{I}{\delta},$$

гдѣ δ нѣкоторый коэффиціентъ, который для синусоиды равенъ

$$\delta = \sqrt{2} = 1{,}414.$$

Въ случаѣ перемѣннаго тока законъ Ома справедливъ для мгновенныхъ значеній, т.-е.

$$i = \frac{e}{r}.$$

Дѣйствующія же значенія связаны соотношеніемъ

$$\mathfrak{J} = \frac{\mathfrak{E}}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{\mathfrak{E}}{\sqrt{r^2 + (2\pi c L)^2}},$$

гдѣ L коэффиціентъ самоиндукціи. Знаменатель этой дроби носитъ названіе полнаго сопротивленія, членъ же $\omega L = 2\pi c L$ безваттнаго (индуктивнаго) сопротивленія.

Магнитный потокъ Φ, охватываемый катушкой въ w витковъ, индуктируетъ въ ней электродвижущую силу, дѣйствующее значеніе которой

$$\mathcal{E} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} c w \Phi . 10^{-8} = 4{,}44 c w \Phi\ 10^{-8} \text{ вольтъ.}$$

Число магнитныхъ линій на единицу площади называется плотностью потока, или магнитной индукціей.

Потокъ Φ, охватываемый катушкой въ w витковъ, можетъ быть выраженъ черезъ токъ протекающій по катушкѣ и создающій этотъ потокъ; именно

$$\Phi = \frac{0{,}4\pi I w}{R},$$

гдѣ I выражено въ амперахъ, а R представляетъ сопротивленіе магнитному потоку. Оно равно

$$R = \frac{l}{\mu . s},$$

гдѣ l — длина пути магнитнаго потока, s — сѣченіе магнитной цѣпи, μ — магнитная проницаемость среды. Числитель дроби — $0{,}4\pi I w$ называютъ, по аналогіи съ закономъ Ома, магнитодвижущей силой.

Если путь магнитныхъ линій состоитъ изъ отдѣльныхъ послѣдовательныхъ участковъ различнаго поперечнаго сѣченія или различной магнитной проницаемости, то общее магнитное сопротивленіе будетъ:

$$R = \frac{l_1}{\mu_1 s_1} + \frac{l_2}{\mu_2 s_2} + \frac{l_3}{\mu_3 s_3} + \ \ldots$$

Если же путь магнитныхъ линій состоитъ изъ нѣсколькихъ параллельныхъ вѣтвей съ различнымъ магнитнымъ сопротивленіемъ, то магнитная проводимость $\frac{1}{R}$ всѣхъ путей выразится такъ же, какъ при развѣтвленіи токовъ, черезъ

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \ \ldots$$

Откуда для двухъ параллельныхъ вѣтвей

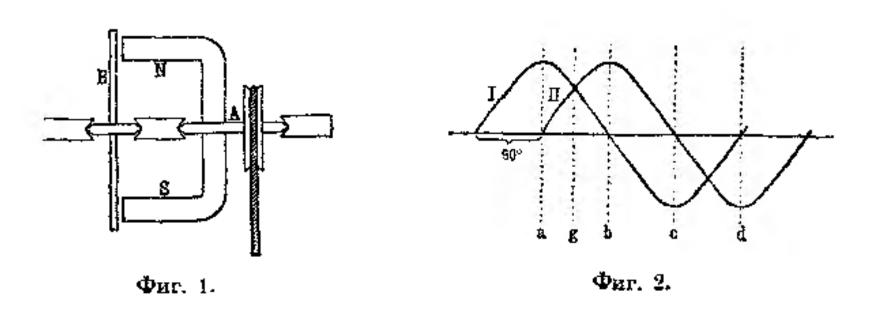
$$R = \frac{R_1 \ R_2}{R_1 + R_2}$$

Принципъ дѣйствія асинхронныхъ двигателей.

2. Понятіе о вращающемся магнитномъ полѣ.

Если вращать постоянный магнитъ NS вокругъ оси A, то мѣдный дискъ B, расположенный противъ концовъ магнита на той же оси, придетъ во вращательное движеніе въ томъ же направленіи.

Исходящія изъ полюсныхъ концовъ NS магнитныя линіи пронизываютъ дискъ, вслѣдствіе чего при вращеніи магнита въ дискѣ индуктируются токи, направленіе которыхъ, по закону Ленца, таково, что они противодѣйствуютъ вращенію магнита. Если же, прикладывая внѣшнюю силу, вращать магниты, то и дискъ долженъ слѣдовать за магнитомъ. Такимъ образомъ получается механизмъ, гдѣ вращеніе одной части передается другой безъ всякой между ними механической связи. Передача движенія и работы происходитъ исключительно при помощи силовыхъ линій, исходящихъ изъ вращающагося магнита и пронизывающихъ дискъ.



Фиг. 1. Фиг. 2.

Если осуществить вращеніе магнитнаго поля не вращеніемъ магнитовъ, а какимъ-нибудь другимъ способомъ, безъ посредства механической силы, то получится двигатель.

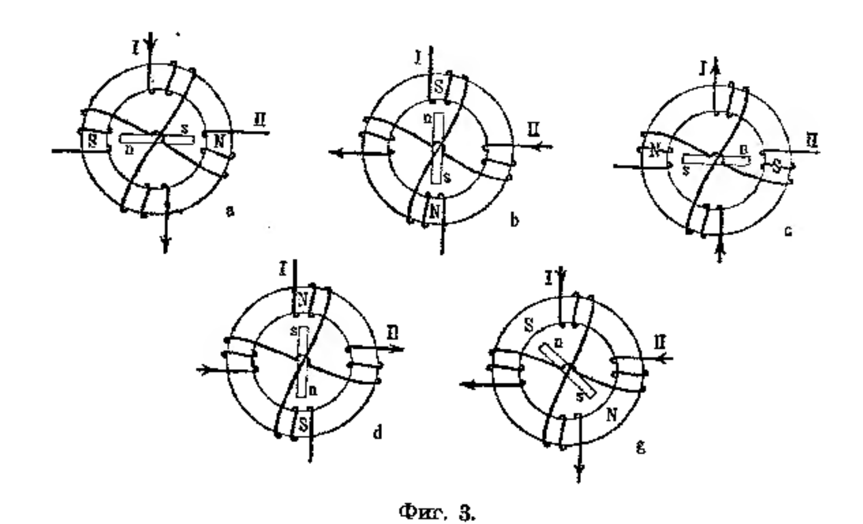
Способъ созданія вращающагося магнитнаго поля безъ вращенія магнита впервые былъ данъ Феррарисомъ. Простѣйшій способъ таковъ: два перемѣнныхъ тока сдвинутыхъ по фазѣ другъ относительно друга на $^1/_4$ періода, т. е. на 90^0 (фиг. 2), пропускаются по катушкамъ, помѣщеннымъ на желѣзномъ кольцѣ, какъ это представлено схематически на фиг. 3.

Въ моментъ a токъ I имѣетъ свое наибольшее значеніе, въ то время какъ токъ II равенъ нулю. Токъ I намагничиваетъ кольцо и образуетъ сѣверный и южный полюсъ, какъ

показано на фиг. 3*a*. Если помѣстить въ центрѣ кольца постоянный магнитъ *ns* то онъ приметъ указанное на фиг. положеніе.

Черезъ 1/4 періода въ моментъ *b* токъ II имѣетъ максимальное значеніе, а токъ I равенъ нулю.

Направленіе магнитнаго поля для этого момента показано на фиг. 3*b*. По сравненію съ фиг. 3*a* оно, а за нимъ и магнитъ *ns*, повернулись на 1/4 окружности. Въ моментъ *c* токъ II —нуль, токъ же I достигаетъ отрицательнаго максимальнаго значенія. Магнитное поле имѣетъ направленіе обратное направленію въ моментъ *a*. Въ моментъ *d* состояніе обратное сравнительно съ *b*, и т. д. Такимъ образомъ за одинъ періодъ тока магнитное поле, а съ нимъ и постоянный магнитъ, совершаетъ поворотъ на полные 360^0. Переходъ между представленными



Фиг. 3.

на фиг. 3 моментами совершается постепенно и непрерывно; напр. въ моментъ *g* (фиг. 3) по обѣимъ обмоткамъ проходятъ одинаковые токи, и въ кольцѣ образуется нѣкоторое результирующее поле (фиг. 3 *g*). Подобнымъ образомъ въ любой моментъ магнитное поле является результирующимъ изъ полей, создаваемыхъ отдѣльными токами.

Ясно, что постоянный магнитъ *ns* внутри кольца долженъ слѣдовать за вращеніемъ поля, такъ какъ полюса его стремятся установиться въ направленіи силовыхъ линій.

Однако не только постоянный магнитъ, но и барабанъ изъ хорошо проводящаго токъ металла, а также желѣзный барабанъ, на которомъ наложена замкнутая на короткое обмотка изъ проводящаго металла, будутъ вращаться по тѣмъ же причинамъ, по которымъ получалось вращеніе диска на модели

фиг. 1. Въ этомъ случаѣ получается такъ называемый асинхронный двигатель. Какъ послѣднiй долженъ быть устроенъ въ цѣляхъ наилучшей работы мы увидимъ впослѣдствiи.

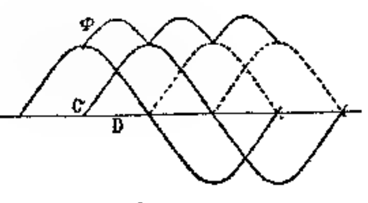
Сначала мы разсмотримъ полученiе, имѣющаго на практикѣ наибольшее значенiе, трехфазнаго вращающагося поля.

Та часть двигателя, къ которой подводится перемѣнный токъ создающiй поле называется статоромъ, ибо обычно она является неподвижной, часть же, вращаемая магнитнымъ полемъ, будь то магнить или барабанъ съ обмоткой, называется роторомъ.

3. Трехфазное вращающееся поле.

Если предположимъ, что перемѣнные токи, создающiе вращающееся поле, измѣняются по закону синусовъ, и, если отдѣльныя поля, создаваемыя токами, однородны и полностью накладываются другъ на друга въ пространствѣ занимаемомъ роторомъ, то для полученiя характера результирующаго поля слѣдуетъ сложить ординаты сдвинутыхъ другъ относительно друга на 90^0 синусоидъ (фиг. 4).

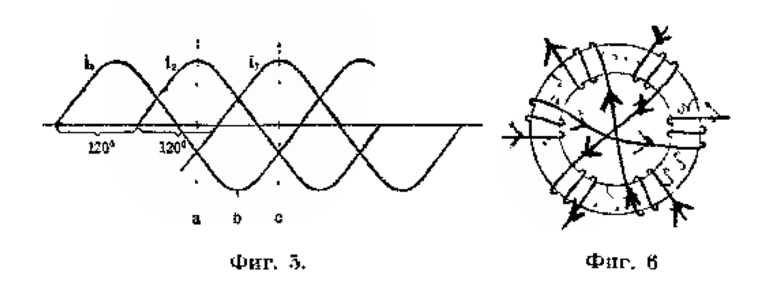
Магнитныя поля, соотвѣтствующiя отрицательнымъ значенiямъ кривыхъ тока, должны быть отложены въ положительную сторону (пунктирныя линiи), такъ какъ мы разсматриваемъ лишь строенiе вращающагося поля независимо отъ направленiя вращенiя. Такимъ образомъ получается кривая Φ, которая указываетъ, что результирующее поле не постоянно, а пульсируетъ между значенiями C и D. Эти пульсацiи повышаютъ потери на токи Фуко и на гистерезисъ, а также вызываютъ неравномѣрность вращающаго момента, вслѣдствiе чего ихъ стараются устранять. Въ двигателяхъ же отдѣльныя поля неоднородны и накладываются другъ на друга не полностью (фиг. 3 и 6). Впослѣдствiи (глава 35) мы увидимъ, что при нѣкоторомъ идеальномъ распредѣленiи отдѣльныхъ полей получается такое вращающееся поле, которое имѣетъ въ различные моменты одинаковую интенсивность и вращается съ равномѣрной скоростью. Въ техникѣ примѣняются преимущественно трехфазные асинхронные двигатели, а потому мы и займемся, главнымъ образомъ, трехфазными вращающимися полями. Аналогичную обмоткѣ фиг. 3, но для трехфазнаго тока, представляетъ—фиг. 6.



Фиг. 4

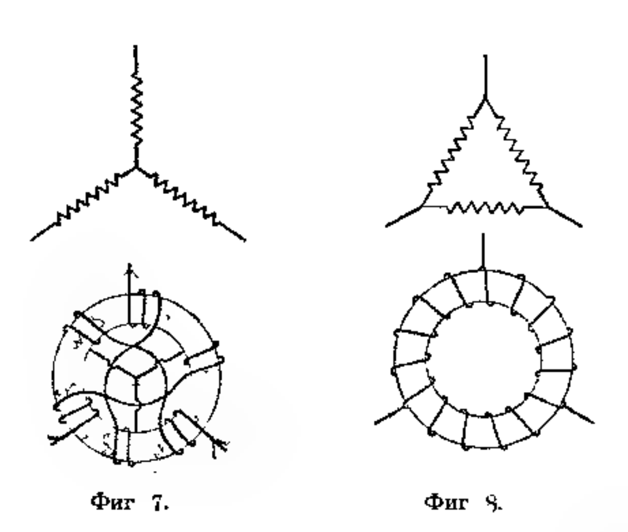
Трехфазный токъ имѣетъ то преимущество, что несмотря на существованiе шести концовъ обмотки, требуетъ только трехъ подводящихъ токъ проводниковъ. Это понятно изъ

фиг. 5, гдѣ, напр., въ моменъ a $i_2 = \ (i_1 + i_3)$, въ моментъ $b - i_1 = (i_2 + i_3)$ и въ моментъ c $i_3 = (i_1 + i_2)$; такъ и въ каждый другой моментъ.



Фиг. 5. Фиг. 6

Другими словами въ каждый моментъ одинъ токъ является обратнымъ для двухъ другихъ. Для этого необходимо, чтобы обмотки были соединены между собою опредѣленнымъ образомъ, именно такъ, чтобы каждый изъ 3-хъ проводовъ былъ соединенъ симметрично съ двумя другими. Соединеніе производится по схемѣ фиг. 7 или 8.



Фиг 7. Фиг 8.

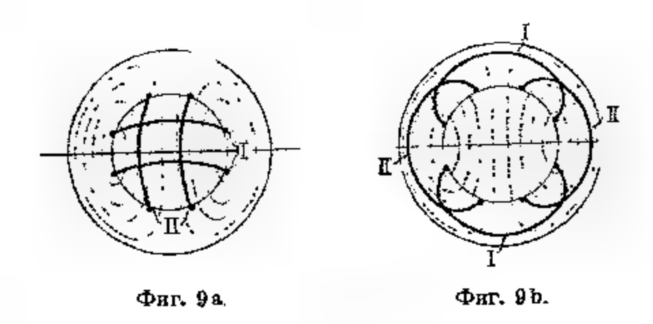
Первое называется — соединеніемъ звѣздой, второе треугольникомъ.

При кольцевой обмоткѣ, какъ это представлено на фиг. 3, 6, 7, 8 потокъ статора замыкается главнымъ образомъ черезъ роторъ, благодаря тому, что воздушный зазоръ между ними дѣлается возможно малымъ и самая обмотка укладывается въ каналахъ.

Если вынуть роторъ изъ статора, то магнитныя линіи будутъ главнымъ образомъ проходить въ кольцѣ и взаимно уничтожаться.

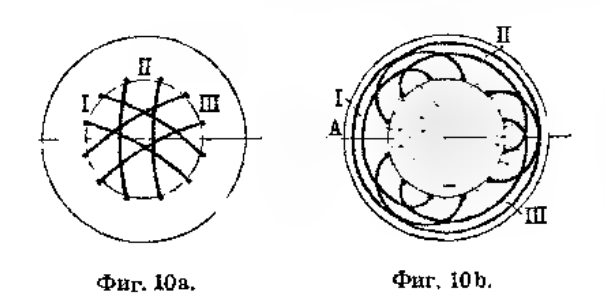
Въ подобной обмоткѣ и при вставленномъ роторѣ значительная часть силовыхъ линій замыкается помимо ротора черезъ воздухъ или кожухъ статора. Это магнитное разсѣяніе значительно меньше при барабанныхъ обмоткахъ.

На фиг. 9 (*a* и *b*) изображено распредѣленіе магнитнаго поля для барабанной обмотки двухфазнаго тока. Магнитныя линіи, создаваемыя обѣими катушками обмотки I должны избрать путь, указанный пунктирными линіями, даже и въ томъ случаѣ, если роторъ вынуть, ибо обмотка охватываетъ не желѣзное кольцо, какъ на фиг 3, а охватываетъ пространство, занимаемое роторомъ. Такой же путь избираютъ и магнитныя линіи создаваемыя обмоткой II, но перпендикулярно къ первымъ. Катушки обмотокъ заходитъ одна за другую, для того чтобы достичь наложенія полей, такъ какъ только въ такомъ случаѣ возможно образованіе вращающагося поля.



Фиг. 9a. Фиг. 9b.

Выполнить обмотку по схемѣ 9а, однако, невозможно, такъ какъ въ такомъ случаѣ невозможно было бы вставить ротора



Фиг. 10a. Фиг. 10b.

Поэтому внѣшніе соединительные проводники должны быть отогнуты въ сторону и размѣщены по торцевой поверхности статора, какъ показано на фиг. 9*b*.

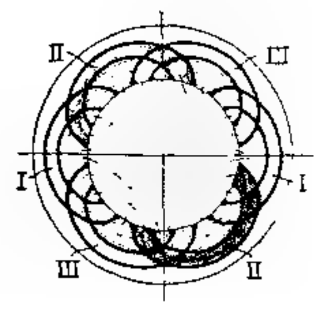
Значительная магнитная утечка на внѣшней поверхности статора имѣетъ мѣсто только тогда, если сѣченіе желѣза сердечника его слишкомъ мало. Для размѣщенія возможно большаго числа витковъ, каждая катушка состоитъ изъ нѣсколькихъ частей, укладываемыхъ въ отдѣльные каналы. Фиг. 10*b* изображаетъ барабанную обмотку трехфазнаго двигателя, гдѣ каждая катушка состоитъ изъ двухъ частей. Фиг. 11 изображаетъ дѣйствительно выполненную обмотку, причемъ каждая катушка состоитъ изъ четырехъ частей.

Фиг. 11

4. Многополюсные двигатели; число оборотовъ

Всѣ схематически разсмотрѣнные до сихъ поръ двигатели были двухполюсные, такъ какъ въ нихъ магнитныя линіи выходили изъ одной половины статора и входили въ другую, какъ будто имѣлись вращающіеся сѣверный и южный полюса. То же будетъ и въ случаѣ барабаннаго ротора; выходящія изъ статора магнитныя линіи входятъ въ одну половину барабана и выходятъ изъ другой. Напр., на фиг. 9 верхняя половина образуетъ одинъ полюсъ, нижняя другой. Каждая пара полюсовъ состоитъ изъ столькихъ группъ катушекъ, сколько имѣется фазъ, при двухфазномъ токѣ, слѣдовательно, изъ двухъ (фиг. 9), а при трехфазномъ —изъ трехъ группъ (фиг. 10).

Представимъ себѣ кольцо статора, фиг. 10*b*, въ одномъ мѣстѣ разрѣзаннымъ, напр. въ *A*, и разогнутымъ въ полукругъ и приложимъ къ нему совершенно такой же полукругъ, тогда получимъ четырехполюсный статоръ, фиг. 12, такъ какъ магнитныя линіи входятъ въ двухъ и выходятъ въ двухъ мѣстахъ. Соотвѣтственно этому получается четыре поля, изъ которыхъ каждыя два образуютъ пару полюсовъ. Эти поля вращаются около оси двигателя такъ, что въ теченіе одного періода тока поворачиваются на одну пару полюсовъ, какъ и раньше при двухполюсномъ двигателѣ; въ данномъ



Фиг. 12

случаѣ поворотъ будетъ на 180°. Одному полному обороту соотвѣтствуетъ поэтому два періода тока. Такимъ образомъ, число оборотовъ n_1 вращающагося поля въ единицу времени (въ секунду) мы получимъ, если число періодовъ тока статора раздѣлимъ на число паръ полюсовъ p:

$$n_1 = \frac{c_1}{p}$$

или, что то же самое, число перемѣнъ тока $2c_1$ на число полюсовъ $2p$.

Какъ мы увидимъ позже роторъ ненагруженнаго двигателя, подобно магниту *ns* фиг. 3, вращается вмѣстѣ съ полемъ и лишь нѣсколько отстаетъ отъ него благодаря тренію въ подшипникахъ и о воздухъ, поэтому теоретическое число оборотовъ ротора равняется числу оборотовъ поля n_1. Если напр. подвести къ четырехполюсному двигателю токъ въ 50 періодовъ (или 100 перемѣнъ), то его теоретическое число оборотовъ равно 25 въ секунду или 1500 въ минуту.

5. Принципъ дѣйствія асинхроннаго двигателя.

Вернемся къ фиг. 3, гдѣ постоянный магнитъ находится во вращающемся полѣ. Какъ уже упомянуто, онъ долженъ вращаться вмѣстѣ съ полемъ, такъ какъ полюса его постоянно устанавливаются въ направленіи силовыхъ линій. Его вращеніе, слѣдовательно, синхронно съ вращеніемъ магнитнаго поля. Такого рода двигатель называется синхроннымъ.

Обратно, если не пускать токъ въ обмотку кольца, а вращать магнитъ механической силой, то по закону Ленца въ обѣихъ обмоткахъ индуктируются токи, противодѣйствующіе движенію; относительное измѣненіе этихъ токовъ во времени показано на фиг. 2.

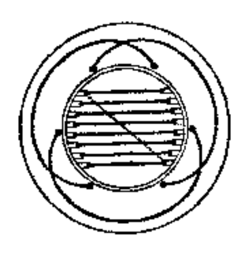
Такой механизмъ, слѣдовательно, является генераторомъ, дающимъ двухфазный перемѣнный токъ. Если обмотка сдѣлана, какъ на фиг. 7 или 8, то получается трехфазный перемѣнный токъ.

Если помѣстить во вращающееся магнитное поле барабанъ изъ желѣзныхъ круглыхъ листовъ, то онъ не будетъ вращаться, такъ какъ въ немъ не будетъ магнитныхъ полюсовъ, которые стремились бы установиться въ направленіи магнитныхъ линій Для того, чтобы барабанъ могъ притти во вращеніе, необходимо было бы, чтобы этотъ сортъ желѣза обладалъ способностью сохранять значительный остаточный магнитизмъ, дабы въ немъ могли образоваться хоть слабые полюса.

Вращеніе могло бы получиться и въ такомъ случаѣ, если въ массѣ желѣза барабана образовались бы достаточной силы токи Фуко, которые могли бы вызвать вращеніе по той же

причинѣ, какъ на фиг. 1*b*. Но силы, получаемыя по обѣимъ этимъ причинамъ, практически такъ малы, что не могутъ быть приняты во вниманіе.

Но если наложить на желѣзный барабанъ короткозамкнутую обмотку изъ мѣдной проволоки (фиг. 13), то получается практически пригодный вращающій моментъ, потому что вращающееся магнитное поле рѣжетъ обмотку барабана и индуктируетъ въ ней токи, которые, какъ на фиг. 1, получаютъ такое направленіе, что стремятся задержать вращеніе поля. Такъ какъ они этого сдѣлать не могутъ, то самъ барабанъ долженъ начать вращаться вмѣстѣ съ полемъ. Но его вращеніе не синхронно съ послѣднимъ, какъ въ разсмотрѣнномъ случаѣ съ постояннымъ магнитомъ. Если бы вращеніе совпадало точно съ вращеніемъ поля, то въ обмоткѣ ротора не индуктировалось бы никакихъ токовъ, такъ какъ тогда не было бы перерѣзыванія силовыхъ линій проводниками обмотки. А, слѣдовательно, въ такомъ случаѣ вращающій моментъ былъ бы равенъ нулю. Однако треніе, существующее при всѣхъ обстоятельствахъ, даже при отсутствіи нагрузки, вызвало бы отставаніе ротора отъ магнитнаго поля. Какъ только начинается отставаніе ротора, такъ обмотка начинаетъ рѣзать силовыя линіи, въ ней индуктируются токи и отъ взаимодѣйствія ихъ съ полемъ получается вращающій моментъ. Такой двигатель, слѣдовательно, имѣетъ стремленіе по возможности догнать вращающееся поле, но никогда этого сдѣлать не можетъ, т.-е. никогда не достигаетъ синхронизма. Поэтому такой двигатель есть **асинхронный** двигатель, роторъ котораго вращается медленнѣе поля. Такъ какъ моментъ является слѣдствіемъ индуктируемаго въ обмоткѣ ротора тока, то онъ можетъ быть названъ также **индукціоннымъ** двигателемъ. Отставаніе скорости ротора отъ скорости поля называется **скольженіемъ** ротора.


Фиг. 13.

Изъ только что сказаннаго вытекаетъ, что вращающій моментъ и скольженіе находятся въ тѣсной связи между собою. Къ такому же выводу мы пришли бы и изъ основного закона о взаимодѣйствіи проводника съ токомъ, движущимся въ магнитномъ полѣ параллельно самому себѣ и перпендикулярно къ направленію магнитныхъ линій.

Сила взаимодѣйствія въ каждый моментъ пропорціональна току и магнитному полю. Съ такимъ фактомъ мы и имѣемъ здѣсь дѣло. Въ короткозамкнутой обмоткѣ возникаютъ токи вслѣдствіе пересѣченія витковъ ея вращающимся полемъ. Взаимодѣйствіе этихъ токовъ съ полемъ выражается въ полученіи силы тяги на окружности ротора, приложенной къ проводникамъ обмотки по всей длинѣ желѣза ротора и направленной по касательной къ ротору.

Сила тяги, умноженная на радіусъ ротора, даетъ вращающій моментъ.

При холостомъ ходѣ двигателя, когда вращающій моментъ преодолѣваетъ только треніе въ подшипникахъ и о воздухъ, роторъ вращается со скоростью незначительно меньшей, чѣмъ скорость поля; скольженіе ротора въ магнитномъ полѣ такое, какое нужно для полученія въ обмоткѣ ротора тока достаточнаго для созданія необходимой силы тяги, способной преодолѣть треніе.

При нагрузкѣ двигателя, вращеніе ротора замедляется, т.-е. скольженіе увеличивается. Вслѣдствіе этого короткозамкнутая обмотка перерѣзываетъ большее число магнитныхъ линій, индуктируемый токъ усиливается, а съ нимъ и сила тяги.

Особенностью асинхроннаго двигателя является, слѣдовательно, то, что скольженіе его тѣмъ больше, чѣмъ больше онъ нагружается.

6. Число періодовъ тока въ роторѣ и скольженіе.

Если ω_1 угловая скорость вращенія поля, а ω_2 ротора, то скольженіе опредѣлится такъ:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = 1 - \frac{\omega_1}{\omega_2},$$

т.-е. представляетъ отношеніе разности скоростей $\omega_1 - \omega_2$ (относительной скорости) къ скорости вращенія поля.

При неподвижномъ роторѣ $\omega_2 = 0$ и, слѣдовательно, скольженіе $s = 1$.

Для другого крайняго случая, именно, когда роторъ вращается синхронно съ полемъ, $\omega_1 = \omega_2$, скольженіе $s = 0$.

Угловая скорость ни что иное, какъ число оборотовъ въ секунду умноженное на 2π.

Если n_1 обозначаетъ число оборотовъ вращающагося поля, n_2 — число оборотовъ ротора, то получится:

$$\omega_1 = 2\pi n_1,$$
$$\omega_2 = 2\pi n_2,$$

ткуда слѣдуетъ, что

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \ldots \ldots \ldots (3)$$

$$n_2 = n_1 (1 - s) \quad \ldots \ldots \ldots (4)$$

Обычно скольженіе умножаютъ на 100, т.-е. выражаютъ въ процентахъ

Важно также соотношеніе между числомъ періодовъ c_1 первичнаго, подводимаго въ статоръ, тока и числомъ періодовъ c_2 вторичнаго, индуктируемаго въ обмоткѣ ротора, тока.

Когда роторъ стоитъ, токъ въ немъ имѣетъ то же число періодовъ, какъ и первичный, такъ какъ тогда двигатель отличается отъ трансформатора только внѣшней формой.

Въ другомъ крайнемъ случаѣ, когда роторъ вращается синхронно съ полемъ, магнитныя линіи имъ не перерѣзываются и число періодовъ тока въ немъ равно нулю. Во всѣхъ другихъ случаяхъ c_2 лежитъ между этими предѣлами. Разсмотримъ двухполюсный двигатель фиг. 3 и 9, гдѣ поле во время одного періода первичнаго тока совершаетъ полный оборотъ. Въ этомъ случаѣ число періодовъ равно числу оборотовъ поля

$$c_1 = n_1$$

Если роторъ отстанетъ отъ поля въ секунду на одинъ оборотъ, то число періодовъ вторичнаго тока равно единицѣ; если онъ отстанетъ на два оборота, то число періодовъ равно 2 и т. д. Слѣдовательно число періодовъ ротора равно разности чиселъ оборотовъ вращающагося поля и ротора

$$c_2 = n_1 - n_2$$

Изъ двухъ послѣднихъ равенствъ слѣдуетъ

$$\frac{c_2}{c_1} = s \quad \text{или} \quad c_2 = c_1 s\,, \quad \ldots\ldots\ldots (5)$$

т.-е. число періодовъ тока ротора равно произведенію числа періодовъ тока, подводимаго къ статору, на скольженіе. Это справедливо также и для многополюснаго двигателя, такъ какъ

$$c_1 = p n_1 \quad \text{и} \quad c_2 = p\,(n_1 - n_2)\,,$$

здѣсь p число паръ полюсовъ двигателя.

Откуда опять вытекаетъ равенство (5)

7. Вращающій моментъ и скольженіе.

Возвратимся къ механизму, изображенному на фиг. 1, и выведемъ одно важное механическое соотношеніе.

Обозначимъ черезъ M вращающій моментъ, передаваемый магнитнымъ полемъ съ одной вращающейся части на другую. По закону механики мощность, которую вращающееся поле должно передать ротору, выразится такъ

$$W_1 = \omega_1 M \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

гдѣ ω_1 угловая скорость вращающагося поля. Мощность же дѣйствительно передаваемая ротору равна

$$W_2 = \omega_2 M \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

гдѣ ω_2 угловая скорость вращенія ротора.

Если пренебречь всѣми прочими побочными явленіями, то W_2, т. е. работа произведенная дискомъ въ единицу времени, отличается отъ W_1 лишь на величину потерь въ самомъ дискѣ.

Въ механическихъ передачахъ эта потеря состоитъ изъ потерь на треніе, при электромагнитной передачѣ же — изъ потерь на тепло Джоуля отъ токовъ индуктируемыхъ въ дискѣ.

Назовемъ эту потерю въ единицу времени черезъ V, тогда

$$V = W_1 - W_2 = (\omega_1 - \omega_2) M \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Въ этомъ соотношеніи, выведенномъ на основаніи чисто механическихъ соображеній, ничто не измѣнится, будетъ ли вращающееся поле создаваться вращающимся постояннымъ магнитомъ или способами описанными въ главѣ I и II; отсюда слѣдуетъ, что всѣ дальнѣйшія уравненія справедливы также для всякаго асинхроннаго двигателя.

Изъ равенствъ (2) и (8) слѣдуетъ

$$V = s\omega_1 M, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

а изъ равенства (6)

$$V = sW_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

Это соотношеніе указываетъ, что *тепловыя потери энергіи въ цѣпи ротора получаются умноженіемъ переданной ротору мощности на скольженіе.*

Изъ равенствъ (8) и (10) имѣемъ

$$V = s\,(V + W_2) \text{ или}$$

$$V = \frac{s}{1 - s} W_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1$$

Посредствомъ этого выраженія можно вычислить потери въ цѣпи ротора по отдаваемой роторомъ мощности и скольженію.

Потеря энергіи на тепло Джоуля можетъ быть выражена черезъ ваттное сопротивленіе ротора r_2 и силу тока въ немъ $\mathfrak{J}_2$:

$$V = r_2 \mathfrak{J}_2^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

для однофазной обмотки.

и

$$V = m r_2 \mathfrak{I}_2^2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad (13)$$

для m-фазной обмотки.

Изъ равенствъ (9) и (13)

$$M = \frac{m r_2 \mathfrak{I}_2^2}{\omega_1 s} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (14)$$

Согласно страницѣ 11, $\omega_1 = 2\pi n_1$ и по стр. 9

$$n_1 = \frac{c_1}{p}, \text{ откуда}$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi c_1}{p} \quad \ldots \ldots \quad (15)$$

Тогда равенство (14) преобразуется въ

$$M = \frac{p}{2\pi c_1 s} m r_2 \mathfrak{I}_2^2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad (16)$$

или, вводя снова уравненіе (13),

$$M = \frac{pV}{2\pi c_1 s} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (17)$$

Если r — выражено въ омахъ, $\mathfrak{I}_2$ въ амперахъ и, значитъ, V — въ ваттахъ, то вращающій моментъ M — въ ваттъ-секундахъ (Джоуляхъ).

Для перевода въ лошадиныя силы, нужно раздѣлить на 736:

$$M = \frac{1}{736} \cdot \frac{pV}{2\pi c_1 s} \text{ лош. с} \quad \ldots \ldots \quad (18)$$

Для перевода въ клг.-метры послѣднее равенство нужно умножить на 75:

$$M = \frac{75}{736} \cdot \frac{pV}{2\pi c_1 s} = 0{,}0162 \frac{pV}{c_1 s} \text{ клг. мтр.} \ldots \quad (19)$$

Когда роторъ стоитъ, то $s = 1$, слѣдовательно вращающій моментъ при пускѣ въ ходъ

$$M_a = 0{,}0162 \frac{pV}{c_1} \quad \ldots \ldots \quad (20)$$

Раздѣливъ это выраженіе на радіусъ $\frac{d}{2}$ (въ метрахъ), получимъ силу тяги при пускѣ въ ходъ

$$F = 0{,}0162 \cdot \frac{pV}{c_1 \cdot \frac{d}{2}} \text{ клг.} \quad \ldots \quad (21)$$

8. Максимальный вращающій моментъ двигателя.

Изложенныя уже въ § 5 разсужденія показали, что вращающій моментъ зависитъ отъ скольженія. Изъ равенст. (16) эта зависимость еще не вполнѣ видна, такъ какъ $\mathfrak{J}_2$ само зависитъ отъ скольженія. Поэтому выразимъ сперва $\mathfrak{J}_2$ въ функціи отъ скольженія.

Передача энергіи отъ статора къ ротору совершается при помощи вращающагося магнитнаго поля, переходящаго изъ статора въ роторъ, т.-е. общимъ потокомъ Φ. Этотъ потокъ индуктируетъ въ обмоткѣ ротора эл. дв. силу E_{2t}, которая, по законамъ перемѣнныхъ токовъ, равна

$$\mathfrak{E}_{2t} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} c_2 w_2 \Phi \quad \ldots \ldots \ldots \quad (22),$$

если принять поле синусоидальнымъ. Здѣсь c_2—число періодовъ тока въ роторѣ, w_2—число витковъ обмотки его на фазу.

По другому основному закону имѣемъ

$$\mathfrak{J}_2^2 = \frac{\mathfrak{E}_{2t}^2}{r_2^2 + (2\pi c_2 L'_2)^2} \quad \ldots \ldots \quad (23)$$

гдѣ L'_2—коэффиціентъ самоиндукціи, соотвѣтствующій вторичному полю разсѣянія [1]).

[1]) Эл. дв силу E_{2t} не надо смѣшивать съ такъ наз. вторичной эл.-дв. силой E_2. Послѣдняя индуктируется не общимъ полемъ Φ, а вторичнымъ полемъ Φ_2. Это ясно изъ слѣдующаго: уравненіе напряженій цѣпи вторичнаго тока i_2, индуктируемаго первичнымъ токомъ i_1 будетъ

$$M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2 = 0 \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1),$$

причемъ M обозначаетъ коэффиц. взаимоиндукціи, а L_2—коэфф. самоиндукціи всей вторичной цѣпи. Послѣдній состоитъ изъ самоиндукціи L_{2f} тѣхъ силовыхъ линій, которыя сцѣпляются съ первичнымъ токомъ (соотвѣтствующимъ вторичному фиктивному полю) и самоиндукціи L'_2 тѣхъ линій, которыя сцѣпляются лишь съ вторичнымъ токомъ, т.-е линій вторичнаго потока разсѣянія. Внѣшней самоиндукціи мы не принимаемъ во вниманіе, такъ какъ при нормальной работѣ двигателя она не существуетъ. (*См. на оборотъ*).

Вставляя сюда значеніе $\mathfrak{E}_{2i}$ изъ форм. (22), получимъ:

$$\mathfrak{I}_2^2 = \frac{2\pi^2 c_2^2 w_2^2 \Phi^2}{r_2^2 + (2\pi c_2 L'_2)^2}$$

Вставивъ значеніе c_2 изъ форм. (5), получимъ

$$\mathfrak{I}_2^2 = \frac{2\pi^2 c_1^2 s^2 w_2^2 \Phi^2}{r_2^2 + s^2 (2\pi c_1 L'_2)^2}$$

Теперь для вращающаго момента получаемъ

$$M = \pi m p w_2^2 \Phi^2 \frac{r_2^2 c_1 s}{r_2^2 + s^2 (2\pi c_1 L'_2)^2} \quad . \quad . \quad . \quad (24)$$

Изъ этого выраженія видно, что вращающій моментъ пропорціоналенъ числу паръ полюсовъ p, квадрату витковъ ротора и квадрату потока.

Общій потокъ Φ не равенъ потоку Φ_1, создаваемому обмоткой статора, т. к. часть послѣдняго проходитъ мимо ротора, не пронизывая его обмотки. Положимъ, что

$$\frac{\Phi_1}{\Phi} = \gamma, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (25)$$

гдѣ γ—коэффиціентъ, зависящій отъ первичнаго разсѣянія.

Тогда уравненіе напряженій будетъ:

$$M \frac{di_2}{dt} + L_{2f} \frac{di_2}{dt} + L'_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2 = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Оба первые члена даютъ вмѣстѣ эл.-дв. силу e_{2i}, эффективная величина которой есть $\mathfrak{E}_{2i}$ и которая индуктируется общимъ полемъ Φ Сдвигъ фазъ между этой эл.-дв. силой и вторичнымъ токомъ будетъ

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{2\pi c_2 L'_2}{r_2} \text{ (ср. гл. 16, фиг. 69).}$$

Наоборотъ первые три члена равенства (1) даютъ эл.-дв. силу e_2, эффективная величина которой есть $\mathfrak{E}_2$. Изъ этой эл.-дв. силы получается вторичная сила тока, въ отличіе отъ равен. (23), какъ $\mathfrak{I}_2 = \frac{\mathfrak{E}_2}{r_2}$ и сдвигъ фазъ между вторичнымъ токомъ и этой эл.-дв. силой нуль На самомъ дѣлѣ многіе авторы исходятъ изъ той эл. дв. силы, которая индуктируется вторичнымъ полемъ. Но такой методъ не даетъ правильнаго представленія, такъ какъ магнитную связь статора съ роторомъ представляетъ поле Φ, а не вторичное Φ_2, которое лишь частью сцѣпляется со статоромъ. Исходя изъ вторичнаго поля Φ_2 и эл.-дв силы $\mathfrak{E}_2$ нельзя также сдѣлать заключенія о важной зависимости вращающаго момента отъ вторичной самоиндукціи L'_2, которая показана въ дальнѣйшемъ.

По основному закону

$$\Phi_1 = \frac{\sqrt{2}\,\mathfrak{E}_1}{2\pi c_1 w_1}.$$

Если ввести оба послѣднія выраженія въ уравненіе (24), получимъ

$$M = \frac{m p w_2^2 \mathfrak{E}_1^2}{2\pi w_1^2 z_1^2} \cdot \frac{r_2 s}{c_1 [r_2^2 + s^2 (2\pi c_1 L'_2)^2]} \quad \ldots \quad (26)$$

Такимъ образомъ вращающій моментъ, при прочихъ равныхъ условіяхъ, пропорціоналенъ квадрату первичной эл.-дв. силы, но тѣмъ меньше, чѣмъ больше число періодовъ первичнаго тока. Сложнѣе зависимость M отъ величинъ r_2, s и L'_2. Разсмотримъ, поэтому, подробнѣе эти зависимости, и главнымъ образомъ изслѣдуемъ имѣетъ ли вращающій моментъ максимумъ для какого-либо скольженія. Для нахожденія максимума возьмемъ производную отъ M по s и приравняемъ ее нулю. Для упрощенія соединимъ сперва всѣ величины, не содержащія s въ одинъ коэффиціентъ C и раздѣлимъ числитель и знаменатель на s, тогда

$$M = C \cdot \frac{1}{\frac{r_2^2}{s} + s (2\pi c_1 L'_2)^2}$$

$$\frac{dM}{ds} = -C \frac{\left[-\frac{r_2^2}{s^2} + (2\pi c_1 L'_2)^2\right]}{\left[\frac{r_2^2}{s} + s (2\pi c_1 L'_2)^2\right]^2} = 0.$$

Такъ какъ знаменатель не можетъ быть безконечно большимъ, то числитель долженъ быть нулемъ. Отсюда получаемъ условіе для максимума:

$$s = \frac{r_2}{2\pi c_1 L'_2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (27)$$

Такимъ образомъ вращающій моментъ достигаетъ максимума тогда, когда скольженіе равно отношенію ваттнаго сопротивленія обмотки ротора къ безваттному сопротивленію ея, но отнесенному къ числу періодовъ первичнаго тока, которое предполагается постояннымъ. Этотъ максимумъ наступаетъ при тѣмъ большемъ скольженіи, т.-е. при тѣмъ меньшемъ числѣ оборотовъ, чѣмъ больше отношеніе ваттнаго сопротивленія ротора къ его безваттному сопротивленію. Принявъ во вниманіе уравненіе 5, получимъ условіе максимума въ такомъ видѣ:

$$2\pi c_2 L'_2 = 1 \quad \ldots \ldots \quad (28)$$

т.-е. вращающій моментъ достигаетъ максимума, когда безваттное сопротивленіе, соотвѣтствующее вторичному полю разсѣянія, равняется ваттному сопротивленію ротора. По уравненію (23) получаемъ сдвигъ фазъ между вторичнымъ токомъ и эл.-дв. силой $\mathcal{E}_{2}$:

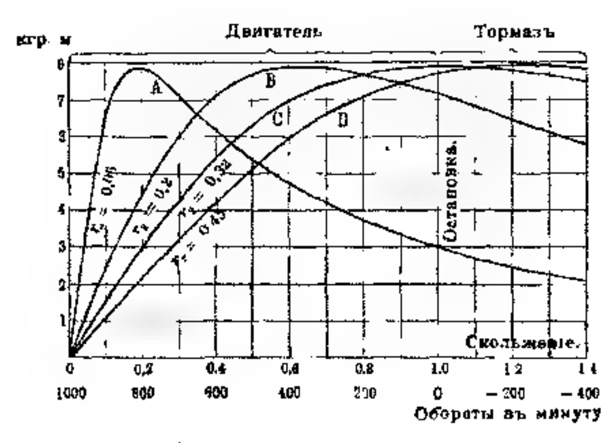
$$\operatorname{tg}\delta = \frac{2\pi c_2 L_2'}{r_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (29)$$

Сопоставляя это выраженіе съ условіемъ максимума для вращающаго момента (28), видимъ что максимумъ для M наступаетъ тогда, когда $\operatorname{tg}\delta = 1$, т.-е. когда тангенсъ угла сдвига фазъ между токомъ и эл. дв. силой $\mathcal{E}_2$, равенъ единицѣ.

Подставивъ выраженіе (27) въ формулу (26), получимъ выраженіе для наибольшаго значенія вращающаго момента

$$M_{\max} = \frac{m p w_2^2 \mathcal{E}_1^2}{8\pi^2 w_1^2 \gamma^2 c_1^2 L_2'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (30)$$

Въ это выраженіе совсѣмъ не входитъ сопротивленіе r_2; слѣдовательно наибольшее значеніе вращающаго момента не зависитъ отъ сопротивленія ротора; оно зависитъ, при прочихъ равныхъ условіяхъ, отъ самоиндукціи, соотвѣтствующей полю разсѣянія ротора. Но величина ваттнаго сопротивленія входитъ въ общее выраженіе для



Фиг. 14. Вращающій моментъ двигателя при различныхъ сопротивленіяхъ въ роторѣ.

вращающаго момента (ур. 26), что даетъ намъ право сдѣлать заключеніе, что величина сопротивленія вліяетъ лишь на то, при какомъ скольженіи вращающій моментъ принимаетъ максимальное значеніе. Это подтверждается кривыми зависимости вращающаго момента (фиг. 14) отъ величины скольженія для

четырехъ различныхъ сопротивленій r_2, причемъ всѣ остальные факторы, въ особенности L'_2, постоянны. Практически это осуществляется включеніемъ соотвѣтствующаго сопротивленія въ цѣпь ротора. На оси абсциссъ отложены скольженіе и числа оборотовъ шестиполюснаго двигателя. Значеніе ваттныхъ сопротивленій, для которыхъ начерчены кривыя, указаны на послѣднихъ. Изъ кривыхъ ясно, что хотя они и различны, но во всѣхъ ихъ максимальныя значенія вращающаго момента одинаковы Но скольженія, при которыхъ наступаютъ максимумы вращающаго момента различны. Для $r_2 = 0{,}06$ ома максимумъ получается при $s = 0{,}19$, для $r_2 = 0{,}2\Omega$—при $s = 0{,}63$ и для $r_2 = 0{,}32\Omega$ только при $s = 1$, т.-е. при троганіи съ мѣста двигателя. Разсматривая ближе кривую C, мы видимъ, что съ увеличеніемъ нагрузки двигателя, т.-е. съ уменьшеніемъ числа оборотовъ отъ 1000 до нуля, вращающій моментъ непрерывно возрастаетъ. Такой двигатель имѣетъ то достоинство, что его вращающій моментъ, въ предѣлахъ обусловленныхъ размѣрами двигателя и приложеннымъ напряженіемъ, возрастаетъ съ увеличеніемъ нагрузки, такъ что въ этихъ предѣлахъ онъ не можетъ остановиться. Онъ подобенъ тѣлу находящемуся въ состояніи устойчиваго равновѣсія. Иначе обстоитъ дѣло при сопротивленіи въ роторѣ, соотвѣтствующемъ кривой A. Здѣсь съ увеличеніемъ нагрузки, т.-е. съ уменьшеніемъ числа оборотовъ, вращающій моментъ растетъ до тѣхъ поръ пока при $s = 0{,}19$ не достигаетъ своего максимума. Если нагружать его дальше, то вращающій моментъ его падаетъ и тѣмъ больше, чѣмъ большимъ становится скольженіе. Поэтому двигатель, перейдя максимумъ, быстро останавливается. Подобный двигатель аналогиченъ тѣлу, находящемуся въ неустойчивомъ равновѣсіи. Скольженіе, при которомъ получается максимальный вращающій моментъ, является такимъ образомъ предѣломъ для нагрузки двигателя. Это скольженіе опредѣляется по форм. (27), а сама предѣльная нагрузка—по форм. (30).

Если сопротивленіе ротора больше 0,32, то максимумъ вращающаго момента наступаетъ при скольженіи большемъ единицы Это, по уравненію (2), будетъ тогда, когда ω_2 отрицательно, т.-е. когда двигатель вращается внѣшней силой въ направленіи обратномъ вращенію поля. При отрицательномъ ω_2 по ур. (7) и W_2 отрицательно.

W_2 есть теперь та мощность, которую необходимо приложить извнѣ для вращенія ротора со скоростью ω_2 въ обратномъ направленіи и, которая, также, какъ и элекрическая мощность, подводимая отъ статора, обращается въ обмотнѣ ротора въ тепло Джоуля. Это слѣдуетъ изъ уравн. (10), согласно которому въ тепло переходитъ тѣмъ большая часть энергіи, подводимой отъ статора, чѣмъ больше скольженіе. При остановкѣ ротора ($s = 1$) вся подводимая энергія обращается въ тепло, и двигатель не даетъ никакой работы, какъ это, очевидно, и должно быть.

Если скольженіе становится больше единицы, то тепловыя потери V превосходятъ мощность W_1, а это возможно только въ томъ случаѣ, если, кромѣ доставляемой сѣтью мощности W_1, въ тепло обращается еще и мощность W_2, затрачиваемая на обратное вращеніе ротора. Такимъ образомъ при скольженіи большемъ единицы двигатель дѣйствуетъ вполнѣ какъ тормазъ, поглощающій энергію.

На практикѣ асинхронный двигатель обыкновенно включается въ сѣть съ постояннымъ напряженіемъ, поэтому неизмѣннымъ въ немъ является не эл.-дв. с., а первичное напряженіе. Вслѣдствіе этого вращающій моментъ нѣсколько меньше, чѣмъ это получалось бы по предыдущимъ формуламъ. Скольженія же, какъ независящія отъ эл.-дв. силы, не измѣняются.

Выраженіе для вращающаго момента можетъ также быть получено изъ основнаго электромеханическаго закона, по которому сила дѣйствующая на проводникъ длиною l съ токомъ $\mathfrak{J}_2$, находящимся въ магнитномъ полѣ съ плотностью B, пропорціональна $l\mathfrak{J}_2B$. Поэтому при постоянномъ B, а значитъ и при постоянной первичной эл.-дв. силѣ, вращающій моментъ зависитъ только отъ $\mathfrak{J}_2$. Это не противорѣчитъ ур. (14), по которому вращающій моментъ зависитъ также отъ ваттнаго сопротивленія вторичной обмотки и скольженія, такъ какъ $\mathfrak{J}_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{r_2}$.

Если, напримѣръ, сопротивленіе r_2 возрастетъ, то токъ $\mathfrak{J}_2$ уменьшится, вслѣдствіе чего двигатель начнетъ вращаться медленнѣе, т.-е. его скольженіе возрастетъ.

Съ увеличеніемъ же скольженія увеличивается и вторичная эл.-дв. сила, т. к.

$$\mathcal{E}_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} c_2 w_2 \Phi_2 \quad \text{и} \quad c_2 = c_1 s.$$

Поэтому, несмотря на увеличеніе ваттнаго сопротивленія, сила тока возстановляется прежняя. Итакъ при измѣненіи сопротивленія ротора измѣняется пропорціонально и скольженіе, такъ что вращающій моментъ при постоянной силѣ поля по уравненію (14) зависитъ только отъ $\mathfrak{J}_2$, такъ какъ ω_1—угловая скорость магнитнаго поля—является величиной постоянной

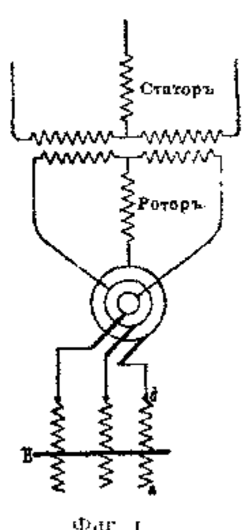
9. Начальный вращающій моментъ.

На практикѣ часто требуется, чтобы двигатель развивалъ при пускѣ въ ходъ возможно большій вращающій моментъ. Это особенно важно въ двигателяхъ для подъемниковъ. Поэтому желательно имѣть въ подобныхъ двигателяхъ сопротивленіе ротора такимъ, при которомъ кривая моментовъ приближалась бы къ кривой C, гдѣ максимальный мо-

ментъ имѣетъ мѣсто при $s=1$, т.-е. при пускѣ въ ходъ. Съ другой стороны коэф. пол. дѣйствія такого двигателя ниже, чѣмъ двигателей работающихъ по кривымъ *A* и *B*, такъ какъ сопротивленіе его ротора больше, а тепловыя потери пропорціональны сопротивленію. Нагрѣваніе въ большинствѣ случаевъ можетъ быть такъ велико, что двигатель не можетъ безъ вреда для себя работать продолжительное время при такихъ условіяхъ. Но r_2 обозначаетъ не только сопротивленіе ротора, но вообще—всей вторичной цѣпи; часть сопротивленія можетъ находиться и внѣ ротора. Когда двигатель пущенъ въ ходъ и достигъ нормальныхъ условій работы, то внѣшняя часть сопротивленія можетъ быть выключена, причемъ обмотка ротора замыкается на короткое. Сопротивленіе обмотки должно быть подобрано такъ, чтобы, съ одной стороны, коэффиціентъ полезнаго дѣйствія былъ возможно выше, съ другой максимальный вращающій моментъ наступалъ при возможно большемъ скольженіи, т. к. въ противномъ случаѣ предѣлъ возможной перегрузки двигателя наступаетъ уже при незначительномъ уменьшеніи числа оборотовъ. Въ большинствѣ двигателей сопротивленіе ротора подбирается такъ, что кривая моментовъ лежитъ между кривыми *A* и *B* (фиг. 14).

Для полученія высокаго к. п. д. и незначительнаго нагрѣванія нужно, чтобы въ предѣлахъ нормальной работы двигателя скольженіе измѣнялось незначительно. Большіе двигатели при полной нагрузкѣ рѣдко имѣютъ скольженіе больше 0,04 (4%), малые—рѣдко больше 0,06 (6%); паденіе же вращающаго момента начинается между 0,2 (20%) и 0,6 (60%) скольженія.

При практическомъ выполненіи двигателя, у котораго часть вторичнаго сопротивленія находится внѣ ротора и выключается при достиженіи нормальнаго числа оборотовъ, необходимо обмотку ротора присоединить къ кольцамъ, черезъ которыя токъ ротора при помощи щетокъ пропускается черезъ внѣшнее сопротивленіе (пусковой реостатъ), какъ это показано схематически на фиг. 15. Конечно это обусловливаетъ болѣе сложную и дорогую конструкцію двигателя сравнительно съ двигателемъ съ коротко-замкнутой обмоткой и безъ пускового приспособленія. Поэтому въ тѣхъ случаяхъ, когда условія работы не требуютъ большого начальнаго момента, предпочитаютъ, въ особенности въ небольшихъ двигателяхъ, коротко замкнутый роторъ.



Фиг. 15.

Въ большинствѣ случаевъ двигатель съ коротко-замкнутымъ роторомъ также развиваетъ достаточный начальный моментъ,

но потребляетъ при этомъ большій токъ, чѣмъ двигатель съ кольцами и пусковымъ реостатомъ. Чтобы подробнѣе разобрать этотъ вопросъ вернемся къ ур. (16). Когда роторъ находится въ покоѣ, скольженіе $s = 1$. Начальный моментъ будетъ

$$M_a = \frac{p}{2\pi c_1} \cdot m\, r_2 \mathfrak{J}_2^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (31)$$

т.-е., при прочихъ равныхъ условіяхъ, онъ пропорціоналенъ квадрату силы вторичнаго тока. Но находящійся въ покоѣ асинхронный двигатель съ коротко-замкнутымъ роторомъ представляетъ собою ни что иное, какъ коротко-замкнутый трансформаторъ. Въ трансформаторѣ же, какъ извѣстно, число первичныхъ и вторичныхъ амперъвитковъ равны, т.-е.

$$\mathfrak{J}_2 w_2 = \mathfrak{J}_1 w_1 \,,$$

откуда

$$M_a = \frac{m p r_2}{2\pi c_1} \cdot \frac{w_1^2}{w_2^2} \cdot \mathfrak{J}_1^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (32)$$

т.-е. **начальный вращающій моментъ пропорціоналенъ квадрату первичнаго,** подводимаго къ статору, **тока, и ваттному сопротивленію вторичной цѣпи.** Для полученія даннаго вращающаго момента при большемъ сопротивленіи въ цѣпи ротора требуется меньшій (въ корень квадратный изъ отношенія сопротивленій раза) токъ.

Поэтому для возможно меньшаго потребленія тока при пускѣ въ ходъ слѣдуетъ двигатели съ кольцами снабжать регулировочнымъ пусковымъ сопротивленіемъ, которое при передвиженіи контакта B отъ a къ d постепенно уменьшалось бы до нуля. Если по условіямъ работы требуется отъ двигателя небольшой начальный моментъ, то онъ достигается при большомъ вторичномъ сопротивленіи, т.-е. при маломъ расходѣ тока. Двигатель начинаетъ вращаться и, при постоянномъ уменьшеніи сопротивленія реостата, достигаетъ скольженія, при которомъ моментъ имѣетъ максимальное значеніе. При дальнѣйшемъ уменьшеніи сопротивленія соотвѣтственно возрастающему числу оборотовъ (убывающему скольженію), вращающій моментъ нѣкоторое время сохраняетъ свой максимумъ, такъ какъ онъ съ уменьшеніемъ сопротивленія вторичной цѣпи смѣщается въ сторону возрастанія числа оборотовъ (на фиг. 14 влѣво). Такимъ образомъ возможно пустить двигатель въ ходъ при наименьшемъ расходѣ тока, что очень важно въ томъ случаѣ, если мощность источника тока не очень велика по сравненію съ мощностью двигателя, такъ какъ при несоразмѣрно большомъ потребленіи тока двигателемъ въ сѣти получится большое паденіе напряженія.

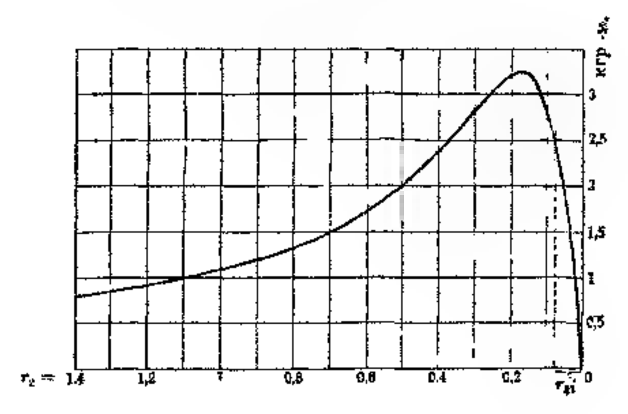
Изъ уравненій (31) и (32) слѣдуетъ, что, при прочихъ равныхъ условіяхъ, **начальный вращающій моментъ обратно пропорціоналенъ числу періодовъ первичнаго тока.** Если условія работы допускаютъ при пускѣ въ ходъ пониженіе числа періодовъ генератора, то этимъ достигается соотвѣтственное увеличеніе вращающаго момента. Этимъ иногда пользуются при пускѣ въ ходъ двигателя. Но изъ уравненія (26) слѣдуетъ, что при любомъ скольженіи вращающій моментъ увеличивается съ уменьшеніемъ числа періодовъ c_1. Но было бы ошибочно отсюда заключить, что выгодно питать двигатель токомъ меньшей частоты, чѣмъ та, на какую онъ расчитанъ.

Не говоря уже о прочихъ, возникающихъ при этомъ, неудобствахъ, въ этомъ случаѣ число оборотовъ двигателя уменьшается, а слѣдовательно уменьшается соотвѣтственно и мощность его.

Для полученія зависимости начальнаго вращающаго момента отъ вторичнаго сопротивленія r_2 при постоянной электродвижущей силѣ подставимъ въ уравненіе (26) $s = 1$; получимъ:

$$M_a = \frac{m p w_2^2 \mathfrak{E}_1^2}{2\pi w_1^2 c_1^2} \cdot \frac{r_2}{c_1[r_2^2 + (2\pi c_1 L'_2)^2]} \quad . \quad . \quad (33)$$

Фиг. 16 даетъ такую зависимость для двигателя въ 2 лошадиныхъ силы.



Фиг. 16. Начальный вращающій моментъ 2-хъ сильнаго двигателя при различныхъ сопротивленіяхъ въ роторѣ.

Слѣдуетъ различать двигатели, пускаемые въ ходъ при большомъ сопротивленіи во вторичной цѣпи, когда въ роторъ включается пусковой реостатъ и двигатели съ незначительнымъ сопротивленіемъ (коротко-замкнутый роторъ). Въ первомъ случаѣ можно величиной $(2\pi c_1 L'_2)^2$ сравнительно съ r_2^2 пренебречь. Тогда, приблизительно, получимъ

$$M_o = \frac{m p w_2^2 \mathfrak{E}_1^2}{2\pi w_1^2 \gamma^2 c_1 r_2} \quad \ldots \quad (34)$$

Въ этомъ случаѣ начальный вращающій моментъ обратно пропорціоналенъ числу періодовъ c_1 и вторичному сопротивленію (лѣвая часть кривой фиг. 16, отъ $r_2 = \infty$ до $r_2 = 0,8$).

Въ двигателяхъ съ небольшимъ сопротивленіемъ вторичной цѣпи можно пренебречь величиной r_2^2 по сравненію съ $(2\pi c_1 L'_2)^2$. Тогда начальный вращающій моментъ приблизительно равенъ

$$M_a = \frac{m p w_2^2 \mathfrak{E}_1^2 r_2}{8\pi^3 w_1^2 \gamma^2 c_1^3 L_2'^2} \quad \ldots \quad (35)$$

Въ этомъ случаѣ начальный вращающій моментъ прямо пропорціоналенъ сопротивленію вторичной цѣпи (фиг 16) и обратно пропорціоналенъ кубу числа періодовъ.

Такимъ образомъ увеличеніе сопротивленія вторичной цѣпи только въ томъ случаѣ влечетъ за собой возрастаніе начальнаго вращающаго момента, пока это сопротивленіе остается ниже извѣстнаго предѣла, опредѣляемаго величиной L'_2 (напр. на фиг. 16 ниже 0,173 Ω). Выше этого предѣла увеличеніе сопротивленія влечетъ за собой уменьшеніе начальнаго вращающаго момента. На фиг. 16 r_{2a} обозначаетъ сопротивленіе самой обмотки ротора (0,08 Ω); если не включено никакого добавочнаго сопротивленія, то двигатель развиваетъ вращающій моментъ въ 2,5 к.-м. (на фиг. 16 показанъ пунктиромъ).

Для полученія наибольшаго начальнаго момента, опредѣляемаго по форм. (30), нужно сопротивленіе вторичной цѣпи взять такимъ, какое оно получится по форм. (27) при $s = 1$.

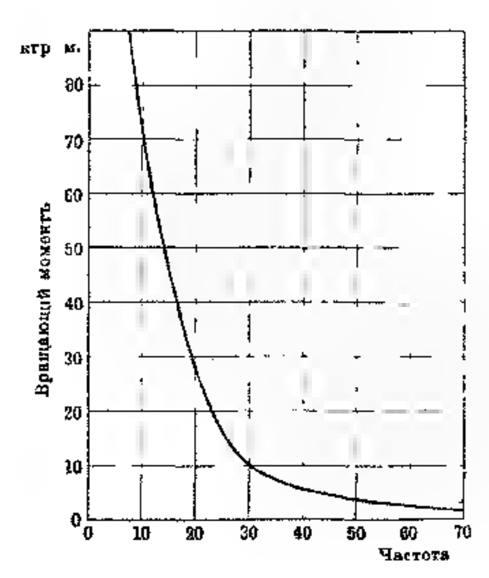
Получимъ

$$r_2 = 2\pi c_1 L'_2,$$

то есть, ваттное сопротивленіе вторичной цѣпи должно быть равно безваттному сопротивленію, соотвѣтствующему вторичному полю разсѣянія, но отнесенному къ числу періодовъ первичнаго тока. Въ нашемъ примѣрѣ оно равно 0,173 Ω. Слѣдовательно необходимо включить въ цѣпь ротора добавочное сопротивленіе въ 0,173 — 0,08 = 0,093 ома, чтобы вращающій моментъ былъ наибольшій (3,24 килограммо-метра) при пускѣ въ ходъ. По кривой фиг. 16 можно опредѣлить и сопротивленія, необходимыя для полученія меньшихъ начальныхъ моментовъ, а по уравненію (31)—найти соотвѣтствующіе токи въ роторѣ и по ур. (32) соотвѣтствующіе токи въ статорѣ. Эти соображенія очень важны для расчета пусковыхъ реостатовъ (ср. гл. 24).

Что касается числа періодовъ, то изъ ур. (33) слѣдуетъ, что начальный моментъ тѣмъ больше чѣмъ меньше число періодовъ. Въ первомъ случаѣ, при большомъ сопротивленіи

вторичной цѣпи (ур. 34), онъ обратно пропорціоналенъ первой степени числа періодовъ, во второмъ же случаѣ, при маломъ сопротивленіи вторичной цѣпи (форм. 35), онъ обратно пропорціоналенъ кубу числа періодовъ. Кривая на фиг. 17 соотвѣтствуетъ второму случаю. Слѣдовательно въ двигателяхъ съ коротко-замкнутымъ роторомъ можно небольшимъ уменьшеніемъ частоты тока значительно увеличивать начальный моментъ.



Фиг. 17. Вращающій моментъ въ зависимости отъ частоты тока.

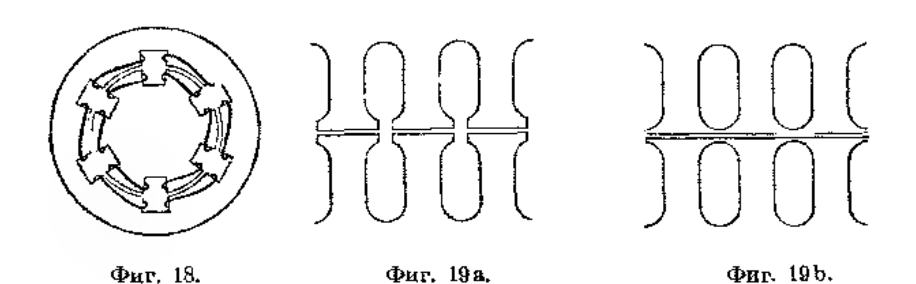
При этомъ однако предполагается, что всѣ прочія величины, въ особенности приложенное къ статору напряженіе, постоянны.

10. Неравномѣрность вращающаго момента

Въ предыдущихъ разсужденіяхъ предполагалось, что вращающееся поле правильное круговое, т.-е. постоянной силы и вращается съ равномѣрной скоростью. Какъ извѣстно изъ главы 2, это достигается наложеніемъ полей отдѣльныхъ фазъ, для чего необходимо, чтобы обмотки сцѣплялись одна съ другой. Если же представить себѣ, въ противоположность фиг. 10 и 12, обмотку двухполюснаго трехфазнаго двигателя, съ расположенными рядомъ катушками (фиг. 18), то роторъ не будетъ вращаться. Дѣйствительно, создаваемый каждой фазой потокъ выходитъ изъ своего строго ограниченнаго полюса и входитъ въ такой же полюсъ ротора. Силы взаимодѣйствія

между первичной и вторичной обмотками направлены по радіусу и взаимно уничтожаются. Нѣчто подобное имѣетъ мѣсто и при нормальныхъ обмоткахъ, если числа зубцовъ на статорѣ и роторѣ равны (фиг. 19a).

Такой двигатель, не получивъ извнѣ толчка, не могъ бы тронуться съ мѣста, когда зубцы ротора и статора находились бы прямо другъ противъ друга. Во избѣжаніе этого статоръ и роторъ должны быть снабжены неодинаковымъ числомъ зубцовъ, и лучше всего, если эти числа не имѣютъ общихъ множителей.



Фиг. 18. Фиг. 19a. Фиг. 19b.

Въ коротко-замкнутыхъ обмоткахъ (на подобіе бѣличьяго колеса) это достигается легко, въ роторахъ же съ кольцами, гдѣ приходится дѣлать правильныя фазовыя обмотки, число зубцовъ должно быть кратнымъ числа полюсовъ и фазъ. При опредѣленныхъ положеніяхъ ротора нѣкоторые зубцы становятся прямо другъ противъ друга, а нѣкоторые почти прямо другъ противъ друга. Вслѣдствіе этого часто случается, что подобные двигатели сами не берутъ съ мѣста безъ внѣшняго толчка, каковымъ можетъ быть сотрясеніе ротора при включеніи двигателя. Однако въ нѣкоторыхъ опредѣленныхъ положеніяхъ подобные двигатели можно остановить рукой. Во всякомъ случаѣ легко замѣтить, что начальный вращающій моментъ такихъ двигателей измѣняется толчками, что зависитъ отъ взаимнаго расположенія зубцовъ статора и ротора

Иначе обстоятъ дѣло, если проводники обмотки уложены не въ открытыхъ, а въ закрытыхъ каналахъ (фиг. 19b). Здѣсь упомянутое обстоятельство не можетъ имѣть мѣста, такъ какъ выходящіе и входящіе въ роторъ потоки, взаимодѣйствуютъ и нарушаютъ симметрію. Если, несмотря на это, такіе двигатели встрѣчаются все рѣже, то это объясняется трудностью ихъ изготовленія. Въ главѣ 8 мы уже видѣли, что поля разсѣянія, въ особенности вторичное, имѣютъ очень важное значеніе (ур. 25).

Оба они прежде всего зависятъ отъ магнитнаго сопротивленія между зубцами, а это послѣднее измѣняется значительно при самыхъ малыхъ измѣненіяхъ толщины мостика

между зубцами (фиг. 19). Подобныя же измѣненія могутъ произойти при обточкѣ на токарномъ станкѣ.

11. Вращающій моментъ, вызываемый токами Фуко и гистерезисомъ.

Отъ пересѣченія вращающимся полемъ ротора индуктируются токи не только въ его обмоткѣ, но и въ листовомъ желѣзѣ ротора, такъ называемые токи Фуко, которые также взаимодѣйствуютъ съ полемъ и создаютъ нѣкоторый вращающій моментъ. Послѣдній однако сравнительно съ моментомъ, создаваемымъ токомъ въ обмоткѣ ротора, такъ незначителенъ, что имъ вполнѣ можно пренебречь. Чтобы принять во вниманіе его, слѣдовало бы увеличить токъ $\mathfrak{J}_2$ на небольшую величину, которую можно было бы опредѣлить приблизительно по тепловымъ потерямъ на токи Фуко.

Кромѣ того, возникаетъ еще небольшой моментъ отъ гистерезиса или вѣрнѣе сказать отъ остаточнаго магнитизма. Такъ какъ въ асинхронномъ двигателѣ первичное поле непрерывно вращается, а роторъ отстаетъ на величину скольженія, то остаточный магнитизмъ на той поверхности, гдѣ потокъ входитъ, отстаетъ отъ остаточнаго магнитизма на поверхности статора, откуда потокъ выходитъ. Между остаточными магнитизмами возникаетъ сила, направленіе которой проходитъ черезъ центры полюсовъ. Эта сила даетъ составляющія въ направленіи радіуса и касательной къ ротору. Послѣдняя вызываетъ вращающій моментъ, который однако тѣмъ меньше, чѣмъ меньше отставаніе ротора, т.-е. скольженіе. При небольшихъ скольженіяхъ моментъ, вызываемый остаточнымъ магнитизмомъ, пропорціоналенъ скольженію.

Въ двигателяхъ съ открытыми каналами кромѣ остаточнаго магнитизма въ полюсахъ имѣется еще остаточный магнитизмъ въ каждомъ зубцѣ. Но такъ какъ въ области каждаго полюса находится нѣсколько зубцовъ, то взаимодѣйствія ихъ остаточныхъ магнитизмомъ взаимно компенсируются.

Такъ какъ для полученія высокаго коэффиціента полезнаго дѣйствія въ двигателяхъ примѣняется желѣзо съ малымъ остаточнымъ магнитизмомъ, то моментомъ послѣдняго можно пренебречь. Однако возможно, что моментъ отъ токовъ Фуко и гистерезиса бываетъ достаточенъ для преодолѣнія сопротивленія воздуха и тренія и для поддержанія вращенія ротора въ холостую при разомкнутомъ роторѣ.

12. Мощность и коэффиціентъ полезнаго дѣйствія.

По закону механики мощность всякаго двигателя равна произведенію изъ угловой скорости на вращающій моментъ.

По уравненію (7)

$$W_2 = \omega_2 M$$

Эта мощность W_2 однако не можетъ быть использована цѣликомъ, такъ какъ часть ея идетъ на преодолѣніе сооротивленій тренія о воздухъ и въ подшипникахъ. Обозначимъ эту часть мощности черезъ R, а полезную мощность черезъ $W_н$, тогда

$$W_н = W_2 - R \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (36)$$

Изъ уравненія (2) имѣемъ

$$\omega_2 = \omega_1 (1-s), \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (37)$$

откуда

$$W_2 = \omega_1 (1-s) M \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (38)$$

или

$$W_2 = \frac{2\pi c_1}{p} (1-s) M \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (39)$$

Подставивъ выраженіе для M изъ уравненія (26), имѣемъ

$$W_2 = \frac{m w_2^2 \mathcal{E}_1^2}{u_1^2 \gamma^2} \cdot \frac{r_2 s (1-s)}{r_2^2 + s^2 (2\pi c_1 L'_2)^2} \quad . \; . \; . \quad (40)$$

При очень малыхъ нагрузкахъ, когда скольженіе незначительно, имъ можно пренебречь сравнительно съ единицей, а членомъ $s^2 (2\pi c_1 L'_2)^2$ — по сравненію съ r_2^2. Въ этомъ случаѣ

$$\omega_2 = \omega_1 = \frac{2\pi c_1}{p}$$

и

$$W_2 = \frac{m w_2^2 \mathcal{E}_1^2}{u_1^2 \gamma^2} \cdot \frac{s}{r_2} \quad . \; . \quad (41)$$

Отсюда (по ур. 26)

$$M = \frac{m p w_2^2 \mathcal{E}_1^2}{2\pi c_1 u_1^2 \gamma^2} \cdot \frac{s}{r_2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (42)$$

Итакъ, при малыхъ нагрузкахъ какъ мощность такъ и вращающій моментъ пропорціональны скольженію. На фиг. 20 это выражается тѣмъ, что нижняя часть кривой скольженія прямолинейна.

Изъ фиг. 22 видно, что мощность въ функціи отъ скольженія, а значитъ и отъ числа оборотовъ ротора, имѣетъ максимумъ. Для нахожденія его слѣдуетъ приравнять нулю производную выраженія для W_2 (ур. 40) по s. Для простоты соеди-

нимъ члены, не зависящіе отъ s, въ одну постоянную C и положимъ $2\pi c_1 = \omega$, тогда

$$W_2 = C \frac{s(1-s)}{r_2^2 + s^2\omega^2 L'^2_2}$$

Отсюда получаемъ условіе для максимума W_2:

$$s^2\omega^2 L'^2_2 + 2 s r_2^2 = r_2^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (43)$$

Такъ какъ это уравненіе квадратное, то изъ него получаемъ два значенія для s, при которыхъ W_2 имѣетъ максимумъ, а именно:

$$s = -\frac{r_2}{\omega^2 L'^2_2}\left(r_2 - \sqrt{r_2^2 + \omega^2 L'^2_2}\right)$$

и

$$s = -\frac{r_2}{\omega^2 L'^2_2}\left(r_2 + \sqrt{r_2^2 + \omega^2 L'^2_2}\right)$$

Изъ этихъ формулъ видно, что скольженіе, при которомъ наступаетъ максимальная мощность двигателя, зависитъ только отъ ваттнаго и безваттнаго сопротивленій вторичной цѣпи его, такъ же какъ и скольженіе, соотвѣтствующее максимуму вращающаго момента (гл. 8).

Первое значеніе s всегда положительно, такъ какъ выраженіе въ скобкахъ всегда отрицательно. Слѣдовательно оно относится къ случаю работы машины двигателемъ, тогда какъ второе значеніе всегда отрицательное и относится къ случаю работы машины генераторомъ, когда роторъ вращается извнѣ со скоростью выше синхронной.

Коэффиціентомъ полезнаго дѣйствія (машины) двигателя называютъ отношеніе полезной мощности двигателя къ полной имъ потребляемой мощности.

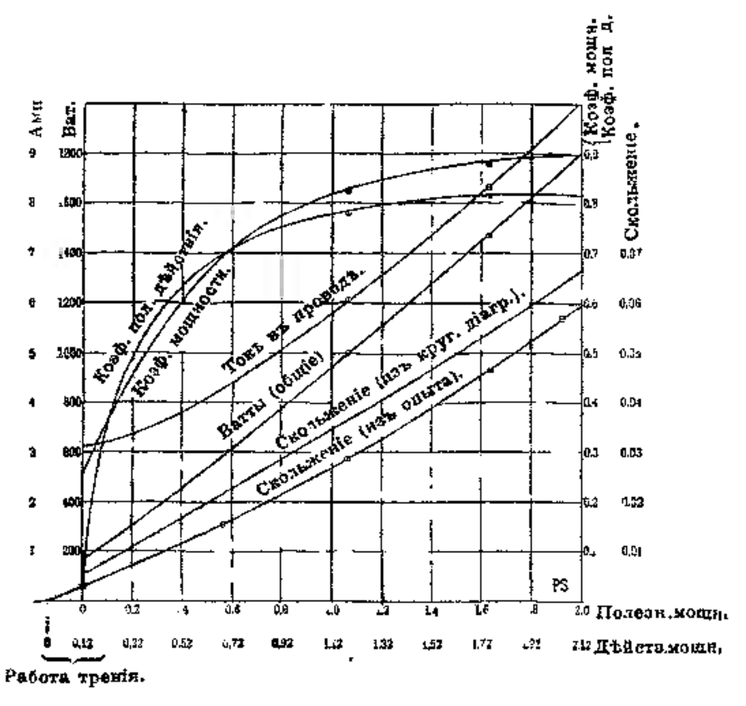
Обозначимъ послѣднюю черезъ Q, тогда

$$\eta = \frac{W_n}{Q}$$

На практикѣ коэф. пол. дѣйствія опредѣляется измѣреніемъ полезной мощности тормазомъ, а потребляемой ваттметромъ. При вычисленіи к. п. дѣйствія нужно принять во вниманіе, что потребляемая двигателемъ мощность состоитъ изъ полезной и идущей на потери. Послѣднія суть: потери на треніе о воздухъ, въ подшипникахъ (а также щетокъ)—R, потери въ желѣзѣ—G, состоящія изъ потерь на гистерезисъ и на токи Фуко въ статорѣ и роторѣ, потери на Джоулево тепло въ обмоткѣ статора—H и потери въ мѣди ротора V. Поэтому

$$Q = W_n + R + G + H + V.$$

Для сужденія о свойствахъ двигателя слѣдуетъ строить кривыя зависимостей к. пол. дѣйствія, коэфф. мощности (cos φ), первичнаго тока, скольженія и вращающаго момента отъ полезной мощности двигателя. Фиг. 20 представляетъ такія кривыя для трехфазнаго четырехполюснаго двигателя нормальной мощности въ 2 лош. силы. Нуль полной, отдаваемой роторомъ, мощности получимъ, отложивъ влѣво отъ нуля полезной мощности потери на треніе. Точки пересѣченія кривыхъ съ осью ординатъ опредѣляютъ соотвѣтствующія значенія при холостомъ ходѣ.

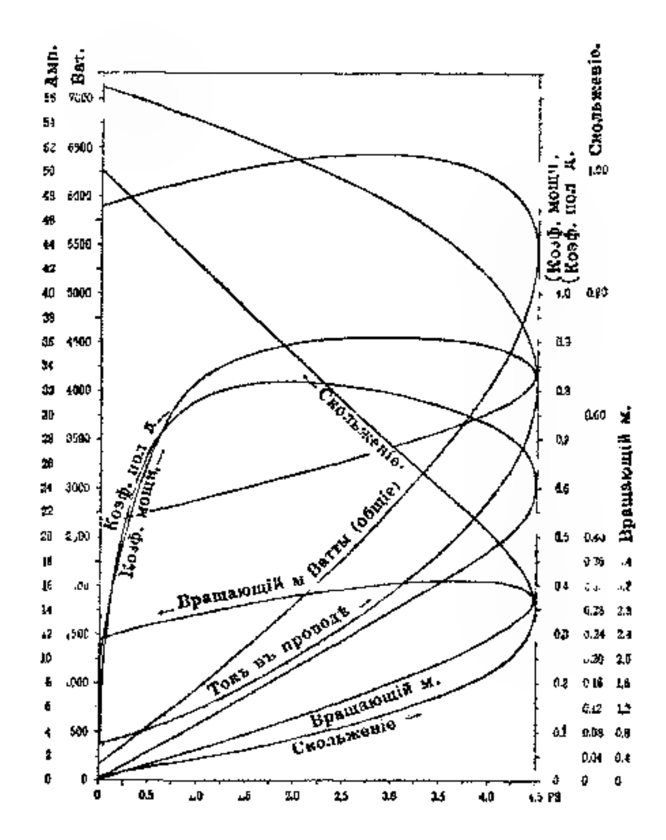


Фиг. 20. Характеристичныя кривыя 2-хъ сильнаго двигателя.

При этомъ коэффиц. полезн. дѣйствія равенъ нулю, въ то время какъ вращающій моментъ и скольженіе равны нулю тамъ, гдѣ мощность отдаваемая роторомъ равна нулю. Сила тока $\mathfrak{J}_1$ и $\cos\varphi_1$ при этомъ не будутъ равны нулю.

На фиг. 21 представлены кривыя для того же двигателя, начиная отъ холостого хода до максимальной нагрузки въ 4,5 лош. силы, при которой всѣ кривыя имѣютъ точку перегиба. Если двигатель нагружать дальше, то его мощность уменьшается до нуля (при остановкѣ). При этомъ скольженіе и токъ возрастаютъ до наибольшихъ, возможныхъ при дан-

номъ напряженіи, величинъ. Вращающій же моментъ растетъ только до величины 3,25 клгр.-мтр., которой онъ достигаетъ при мощности въ 3,6 лош. с. (на нисходящей вѣтви), въ то время, какъ при нормальной мощности (2 лош. с. на восходящей вѣтви), онъ равенъ одному клгр.-метру. Съ величины 3,25 клгр.-мтр. моментъ падаетъ до 2,3 клгр.-мтр. при остановкѣ (начальный моментъ). Такимъ образомъ максимальная мощность превосходитъ нормальную величину въ 2,25 раза, а максимальный вращающій моментъ —въ 3,25 раза.



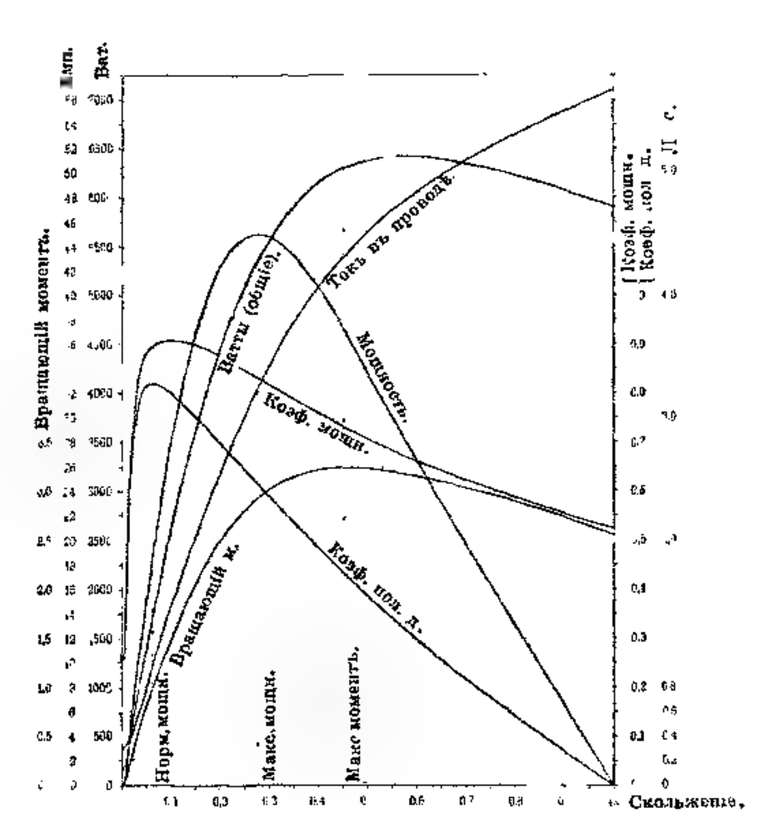
Фиг 21. Характеристичныя кривыя 2-хъ сильнаго двигателя

Коэффиціентъ мощности $\cos\varphi_1$ достигаетъ максимума уже при мощности въ 2,7 лош. с., а коэффиціентъ полезнаго дѣйствія—при 1,9 лош. силы.

Фиг. 22 представляетъ кривыя зависимости тѣхъ же величинъ отъ скольженія, или, что тоже, отъ числа оборотовъ.

Нормальной мощностью въ данномъ примѣрѣ является та, при которой двигатель можетъ работать продолжи-

тельное время безъ чрезмѣрнаго нагрѣванія и за которой онъ допускаетъ извѣстную перегрузку, не останавливаясь. Обычно предѣлъ перегрузки опредѣляется нагрѣваніемъ. Если же



Фиг. 22 Характеристичныя кривыя 2-хъ сильнаго двигателя

двигатель достигаетъ наибольшаго вращающаго момента раньше предѣла допускаемаго нагрѣванія, то перегрузка опредѣляется этимъ моментомъ, такъ какъ въ противномъ случаѣ двигатель работалъ бы даже при незначительной перегрузкѣ на нисходящей вѣтви кривой моментовъ и остановился бы.

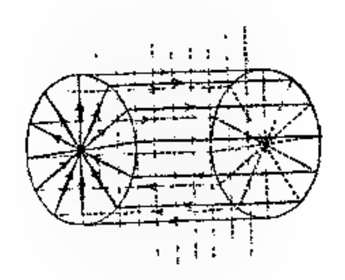
13. Роторъ съ коротко-замкнутой обмоткой.

Осуществленіе обмотки по фиг. 13 было нецѣлесообразно, такъ какъ при ней не вся поверхность цилиндра была бы исполь-

ована. Проще всего было бы покрыть поверхность ротора сплошной мѣдной оболочкой Но такимъ образомъ получился бы значительный зазоръ между желѣзомъ ротора и желѣзомъ статора.

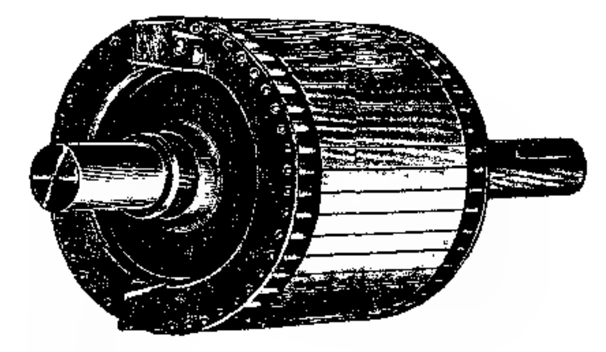
Для проведенія потока черезъ это пространство потребовалось бы большое число ампервитковъ. Въ виду этого величину междужелѣзнаго пространства дѣлаютъ, исходя изъ условій правильной работы и раціональнаго изготовленія, а проводники укладываютъ въ каналахъ.

Чтобы эл.-дв. силы, индуктируемыя въ проводникахъ складывались, необходимо проводники, лежащіе подъ различными полюсами, включить послѣдовательно. Подобное соединеніе проводниковъ обмотки показано схематически на фиг. 23. Помѣстивъ этотъ роторъ въ поле двухполюснаго статора, изображенное пунктиромъ, получимъ въ одной половинѣ ротора токи одного направленія, въ другой противоположнаго. Наибольшая эл.-дв. сила будетъ въ проводникахъ, перерѣзывающихъ максимальное число линій, и сила тока въ каждомъ контурѣ опредѣляется ур. (23), причемъ E_{2t} - эл.-дв. сила, индуктируемая въ обѣихъ сторонахъ витка общимъ полемъ.



Фиг. 23.

Ясно, что распредѣленіе токовъ не измѣнится, если соединить провода въ точкѣ ихъ пересѣченія или присоединить ихъ на лобовыхъ поверхностяхъ къ кольцамъ изъ хорошо проводящаго металла. Такимъ образомъ получается обмотка на подобіе б ѣ л и ч ь я г о к о л е с а (фиг. 24) [1]. Распредѣленіе токовъ

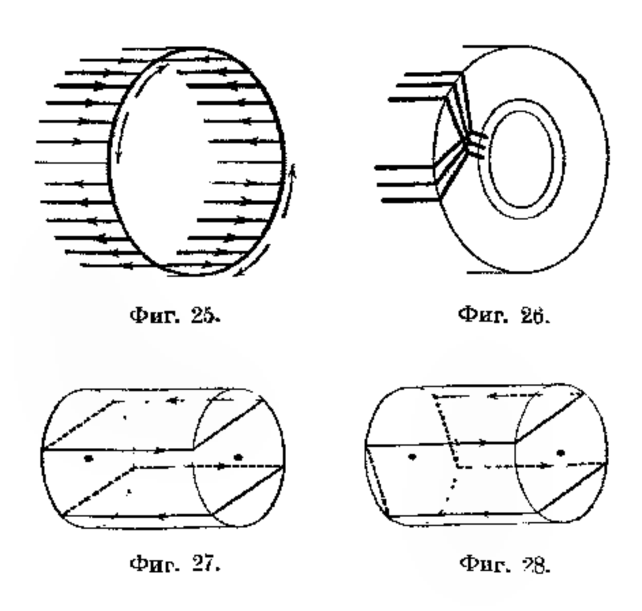


Фиг. 24.

[1]) Два крыла, прикрѣпленныхъ къ кольцамъ, замыкающимъ обмотку на короткое, служатъ для лучшей вентиляціи двигателя, которая безъ того была бы недостаточной.

въ короткозамкнутомъ роторѣ четырехполюснаго двигателя показано на фиг. 25.

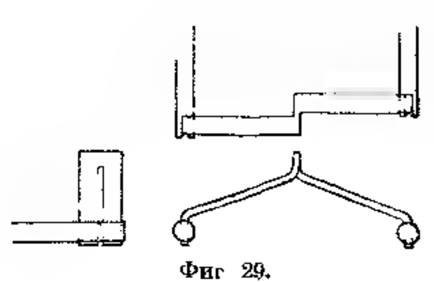
Въ двигателяхъ большой мощности подобныя обмотки не примѣняются, такъ какъ отдача теплоты кольцами недостаточна,



Фиг. 25. Фиг. 26.

Фиг. 27. Фиг. 28.

вслѣдствіе ихъ относительно малой поверхности. Поэтому предпочитаютъ соединять посредствомъ вилокъ одинъ или нѣсколько витковъ, образуя такимъ образомъ замкнутые витки. Для четырехполюснаго двигателя такія соединенія могутъ производиться по схемѣ фиг. 27 или 28. Послѣдняя называется коротко-замкнутой обѣгающей обмоткой. Фиг. 26 показываетъ схематически соединенія вилками (соотвѣтственно фиг. 27). Вилка изготовляется обычно изъ одной полосы, разрѣзанной вдоль по серединѣ, причемъ концы отгибаются въ разныя стороны и припаиваются къ двумъ соединяемымъ стержнямъ (фиг. 29). Какъ видно изъ чертежа, одинъ изъ соединяемыхъ стержней долженъ быть длиннѣе другого на половину ширины вилки. Длинные и короткіе стержни или чередуются (фиг 61) или расположены группами (фиг. 57).



Фиг 29.

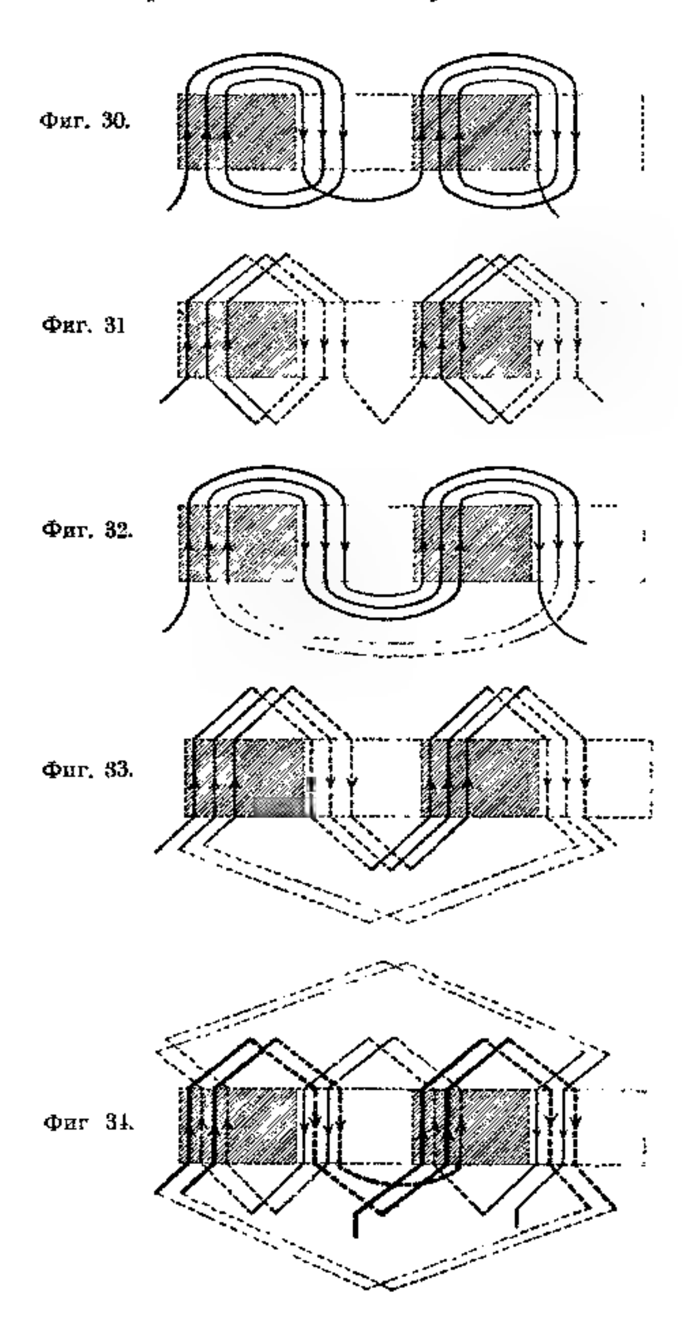
Короткозамкнутая обмотка можетъ быть получена и изъ любой изъ описанныхъ въ дальнѣйшемъ фазныхъ обмотокъ, если начала и концы всѣхъ фазъ соединить между собою.

14. Важнѣйшіе роды обмотокъ статоровъ и роторовъ съ кольцами.

При теоретическомъ изученіи асинхроннаго двигателя мы предполагали наличность однороднаго поля, вращающагося съ равномѣрной угловой скоростью. Изъ главы 10 мы знаемъ, какъ важно это условіе при пускѣ двигателя въ ходъ. Такъ какъ вращающееся поле является результирующимъ полей статора и ротора, то поле ротора въ свою очередь должно быть однороднымъ. Легче всего это условіе выполняется въ обмоткѣ на подобіе бѣличьяго колеса. Если же примѣняется пусковой реостатъ, и обмотка ротора подведена къ кольцамъ, то однородности вращающагося поля достигаютъ, устраивая обмотку ротора совершенно такъ же, какъ и статора. Поэтому всѣ фазныя обмотки примѣнимы, какъ для статора, такъ и для ротора. Различіе же опредѣляется исключительно соотношеніемъ въ нихъ напряженій. Послѣднее опредѣляется для статора тѣмъ рабочимъ напряженіемъ, для котораго онъ предназначенъ, между тѣмъ какъ въ роторѣ напряженіе должно удовлетворять лишь условію, чтобы число амперъ витковъ соотвѣтствовало заданной мощности. Но напряженіе въ роторѣ не слѣдуетъ съ одной стороны выбирать очень высокимъ въ цѣляхъ экономіи на изоляцію и безопасности обслуживанія, съ другой стороны — не слишкомъ низкимъ, для избѣжанія искренія щетокъ, вслѣдствіе большого тока и большихъ сѣченій мѣди.

Какъ мы видѣли уже на фиг. 6—13 каждому полюсу соотвѣтствуетъ одинаковое число рядомъ лежащихъ проводниковъ отъ всѣхъ фазъ, въ которыхъ токи въ каждый моментъ имѣютъ одинаковое направленіе. Если, напр., на фазу и полюсъ приходится три катушка, причемъ каждая лежитъ въ отдѣльномъ каналѣ, то на каждый полюсъ двухфазнаго двигателя приходится 6 впадинъ, трехфазнаго—девять. Если представить себѣ статоръ четырехполюснаго двигателя развернутымъ на плоскость, то получимъ фиг. 30—34, гдѣ заштрихованные площади изображаютъ положеніе полюсовъ въ опредѣленный моментъ, а направленіе токовъ показано стрѣлками. Существуетъ только два способа соединенія проводниковъ одной фазы, лежащихъ подъ парой сосѣднихъ полюсовъ, именно, какъ на фиг. 30 и 31, причемъ получается такъ называемая петлеобразная обмотка или какъ на фиг. 32—34, причемъ получается—волнообразная обмотка. На фиг. 30 и 32 соединеніе проводниковъ произведено при помощи концентрическихъ дугъ, а на фиг. 31, 33 [1]

[1]) Болѣе короткіе стержни какъ и ихъ соединенія на этой и всѣхъ послѣдующихъ фигурахъ изображены пунктиромъ, болѣе длинные и ихъ соединенія изображены сплошными линіями. Это сдѣлано для того, чтобы видѣть перекрещиваются ли двѣ внѣшнихъ или же внутреннихъ ножки. На практикѣ выполнить такую обмотку было бы не возможно.



и 34—перекрещивающимися проводниками, въ качествѣ которыхъ часто примѣняются вилки по фиг. 29. Итакъ, мы будемъ различать 4 рода обмотокъ:

1. Петлеобразная обмотка съ соединеніями дугами.

2. Петлеобразная обмотка съ перекрещивающимися соединеніями.

3. Волнообразная обмотка съ соединеніями дугами.

4. Волнообразная обмотка съ перекрещивающимися соединеніями.

На фиг. 32—34 обмотка идетъ постоянно въ одномъ направленіи. На фиг. 34 обмотка проходитъ всѣ полюса дважды въ одномъ направленіи (жирныя линіи), затѣмъ—въ противоположномъ (тонкія линіи). Слѣдовательно волнообразныя обмотки распадаются на прямыя и на возвратныя.

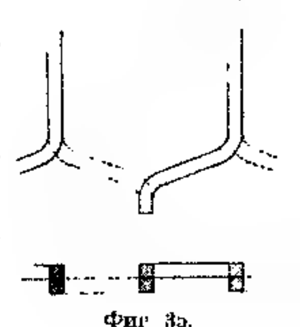
Дальнѣйшее отличіе этихъ послѣднихъ заключается въ томъ, что два послѣдовательныхъ шага обмотки неодинаковы и различаются на два. На фиг. 34 и 59 шаги 10 и 8, а на фиг. 60 14 и 12. Далѣе, обмотка, пройдя одинъ разъ всѣ полюса, подходитъ къ проводнику, лежащему не рядомъ съ первымъ (второму проводнику), какъ на фиг. 32 и 33, а къ третьему проводнику. Во второй проводникъ она попадаетъ лишь послѣ перемѣны направленія хода. Этимъ достигается болѣе равномѣрное распредѣленіе перекрещиваній, чѣмъ при прямой волнообразной обмоткѣ.

Соединеніе вилкой производится такъ, что внѣшняя ножка ея спаивается съ болѣе длиннымъ стержнемъ, а внутренняя съ болѣе короткимъ стержнемъ (фиг. 29).

Неравенство шаговъ при возвратныхъ волнообразныхъ обмоткахъ вызываетъ чередованіе длинныхъ и короткихъ стержней (фиг. 61).

При прямыхъ же волнообразныхъ обмоткахъ (фиг. 33) и при обмоткахъ петлеобразныхъ съ вилками (фиг. 31) длинные и короткіе стержни расположены группами (фиг. 57 и 58).

Возвратная волнообразная обмотка можетъ выполняться еще въ видѣ такъ называемой бочковидной обмотки съ двумя стержнями въ каналѣ. Вмѣсто соединительныхъ вилокъ и различной длины стержней здѣсь требуются лишь нѣсколько болѣе длинные, но одинаковые стержни, и концы верхняго и нижняго стержней отгибаются и спаиваются (фиг. 35). На фиг. 62 изображенъ роторъ съ такой обмоткой. На схемахъ обмотокъ (фиг. 34, 59 и 60) пунктирныя линіи изображаютъ проводники, лежащіе снизу, а сплошные—лежащіе сверху. Такая обмотка имѣетъ передъ обмоткой съ вилками то преимущество, что не нужно изготовлять отдѣльныхъ частей (вилокъ), и число спаевъ уменьшено вдвое. Примѣняя профили-



Фиг. 35.

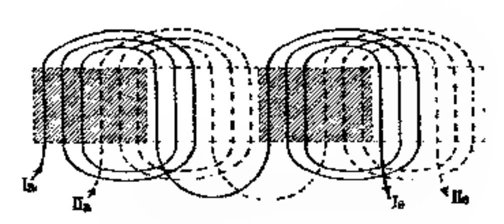
рованные стержни, какъ, наприм., на фиг. 36, получаемъ такое же использованіе мѣста, какъ въ обмоткахъ съ вилками съ однимъ стержнемъ въ каналѣ, въ то время какъ число каналовъ въ два раза меньше. Такого рода обмотка является, такимъ образомъ, наилучшей для двигателей средней мощности.

Фиг 36.

Для двигателей меньшей мощности съ обмоткой изъ тонкой проволоки, наиболѣе удобной, какъ для статора, такъ и для ротора, является петлеобразная обмотка съ соединеніемъ дугами, при этомъ въ каналѣ можетъ быть любое число проволокъ. При петлеобразной обмоткѣ съ перекрещивающимися соединеніями (фиг. 31) головки катушекъ заняли бы больше мѣста.

Волнообразныя обмотки примѣняются лишь для низкихъ напряженій, гдѣ въ каналѣ укладывается не больше двухъ проводниковъ. При высокомъ напряженіи стержней въ каналѣ должно быть болѣе двухъ, чтобы не увеличивать слишкомъ числа каналовъ, а слѣдовательно при волнообразной обмоткѣ для заполненія одного и того же канала пришлось бы обойти нѣсколько разъ вокругъ, и разности потенціаловъ между проводниками, лежащими въ одномъ и томъ же каналѣ, получились бы большими. Для роторовъ большихъ двигателей наиболѣе пригодной является п р я м а я волнообразная обмотка съ соединеніями дугами (фиг. 32 и 33). Единственнымъ недостаткомъ ея является необходимость изготовленія дугъ различной величины.

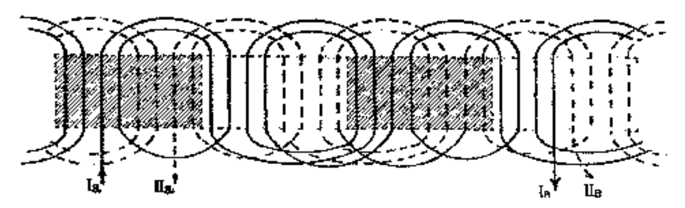
Разсмотримъ теперь устройство двухфазныхъ и трехфазныхъ обмотокъ. При двухфазной обмоткѣ токи сдвинуты во времени другъ относительно друга на $^1/_4$ періода (90°), поэтому обмотки должны быть сдвинуты въ пространствѣ другъ относительно друга на $^1/_4$ д в о й н о г о п о л ю с н а г о д ѣ л е н і я, какъ было показано на фиг. 3 и 9. Исходя изъ этого и изъ того соображенія, что токи въ проводникахъ одного полюса должны имѣть одинаковыя направленія, получимъ



Фиг. 37. Петлеобразная обмотка съ соединеніями дугами.

двухфазную петлеобразную обмотку (съ дугами, фиг 37), если наложимъ двѣ такихъ обмотки, какъ на фиг. 30, съ относительнымъ сдвигомъ на $^1/_2$ полюснаго дѣленія. При четырехъ и вообще четномъ числѣ каналовъ на полюсъ и фазу

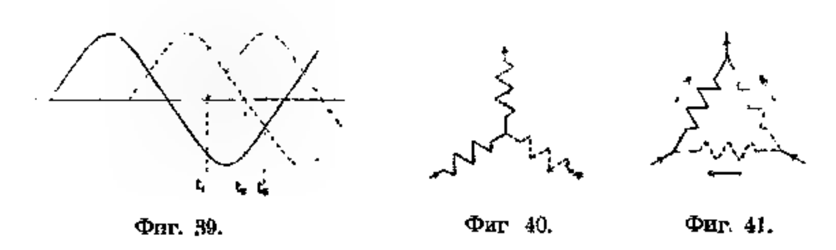
катушки одного полюса и одной и той же фазы могутъ навиваться въ противоположныхъ направленіяхъ (фиг. 38).



Фиг 38. Петлеобразная обмотка съ соединеніями дугами

При трехфазной системѣ токи сдвинуты другъ относительно друга на $^1/_3$ періода (120⁰), слѣдовательно обмотки отдѣльныхъ фазъ должны быть сдвинуты другъ относительно друга въ пространствѣ на $^1/_3$ двойного полюснаго дѣленія, какъ показано на фиг. 7, 8, 10.

Изъ фиг. 39 слѣдуетъ, что въ моменты, когда ни одинъ изъ фазныхъ токовъ не равенъ нулю (какъ, напр., въ моменты t_1 и t_2), два изъ нихъ имѣютъ одинаковое, а третій противоположное направленіе, какъ, напр., въ моментъ t_3. Принимая во вниманіе это обстоятельство и тотъ фактъ, что токи въ проводникахъ подъ однимъ полюсомъ должны имѣть одно направленіе мы можемъ убѣдиться, что трехфазная петлеобразная обмотка (съ дугами) получается, если наложить 3 отдѣльныхъ обмотки по типу фиг. 30 съ относительнымъ сдвигомъ на $^1/_3$ двойного полюснаго дѣленія (фиг. 42).

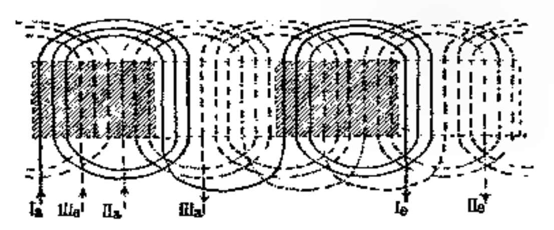


Фиг. 39. Фиг 40. Фиг. 41.

Какъ видно изъ этой схемы, начала обмотокъ сдвинуты на $^1/_3$ двойного полюснаго дѣленія, причемъ въ первыхъ направленіе токовъ одинаковое, а въ третьей обратное, тѣмъ не менѣе направленіе токовъ въ проводникахъ одного полюса одно и то же.

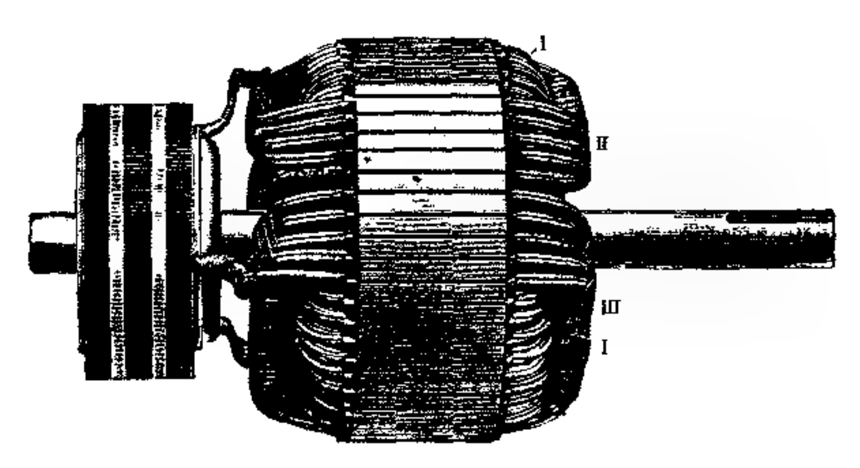
Включеніе звѣздой (фиг. 40) получается соединеніемъ между собой или трехъ началъ, или трехъ концовъ обмотки. Включеніе треугольникомъ (фиг. 41) получается присоединеніемъ концовъ обмотки каждой фазы къ началу об-

мотки слѣдующей фазы. При осуществленіи обмотки слѣдуетъ принимать во вниманіе расположеніе головокъ катушекъ.



Фиг. 42. Петлеобразная обмотка съ соединеніями дугами.

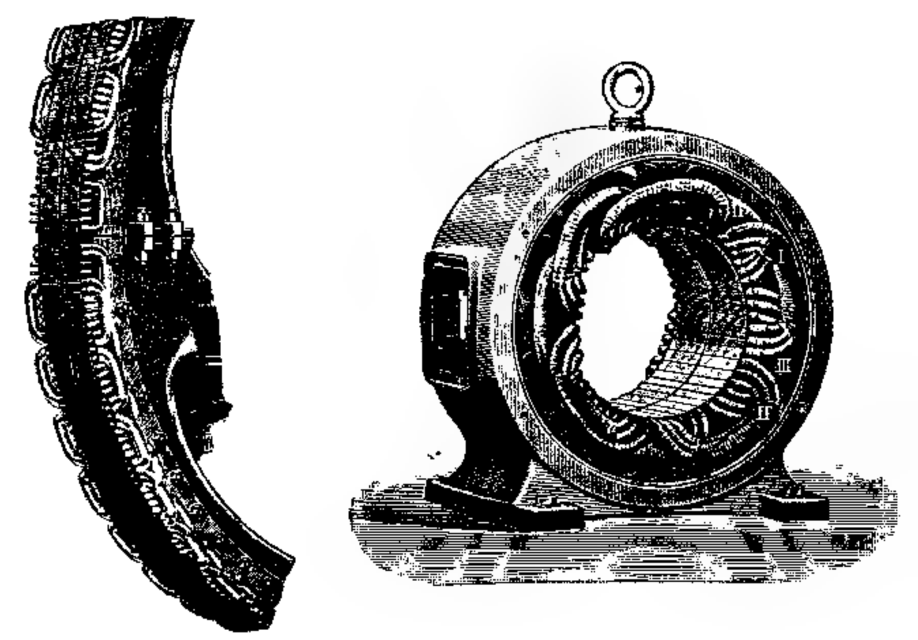
При обмоткахъ этого рода онѣ большею частью лежатъ по очереди другъ надъ другомъ. Вслѣдствіе этого при двухфазной обмоткѣ головки всѣхъ катушекъ одной фазы лежатъ внизу, а другой наверху, тогда какъ при трехфазной обмоткѣ онѣ лежатъ сверху и снизу, чередуясь.



Фиг. 43. Роторъ съ петлеобразной обмоткой.

Фиг. 43—45 и 47 показываютъ практическое осуществленіе такихъ обмотокъ. При шести полюсахъ и вообще при нечетномъ числѣ паръ полюсовъ обмотка получается несимметричная, какъ это показано схематически на фиг. 46. Здѣсь въ одномъ мѣстѣ (A) встрѣчаются двѣ катушки, которыя обѣ должны лежать наверху. Для размѣщенія ихъ необходимо одну изъ нихъ соотвѣтственнымъ образомъ изогнуть. Фиг. 45 показываетъ дѣйствительное осуществленіе изогнутой катушки (наверху налѣво). При высокомъ напряженіи въ каналы вкладываются миканитовыя трубки, черезъ которыя обмотка про

тягивается. Въ нѣкоторыхъ мѣстяхъ разность потенціаловъ между сосѣдними катушками различныхъ фазъ равна полному линейному напряженію. Наименьшее разстояніе между сосѣдними катушками имѣется въ мѣстѣ выхода ихъ изъ трубокъ каналовъ, поэтому слѣдуетъ трубки для катушекъ, лежащихъ снаружи, брать болѣе длинными, а между головками катушекъ различныхъ фазъ прокладывать изолирующія прослойки, какъ напр. показано на фиг. 47 (Сименсъ - Шуккертъ). Всеобщая



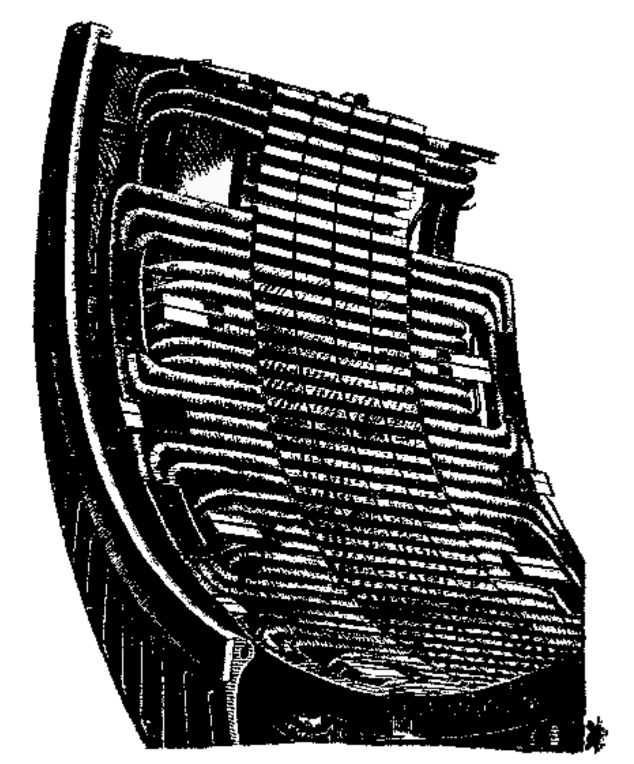
Фиг. 44. Фиг. 45

Петлеобразныя обмотки статора (Вс. Комп. Эл.).

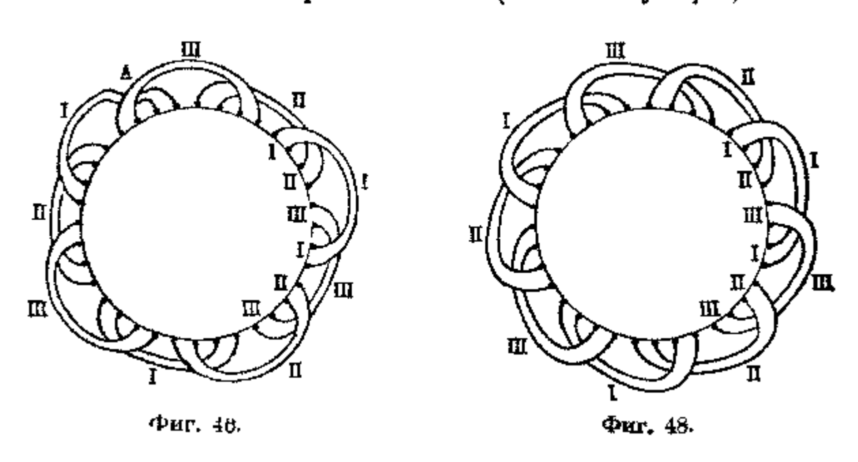
Компанія Электричества примѣняетъ при высокихъ напряженіяхъ чешуйчатое расположеніе головокъ, какъ на фиг. 48 показано схематически, а на фиг. 49 въ дѣйствительности. Одна сторона каждой головки лежитъ вверху, другая внизу. Верхняя часть имѣетъ болѣе длинныя трубки, чѣмъ нижняя, и нигдѣ нѣтъ рядомъ трубокъ одинаковой длины. Фиг. 48 показываетъ, что при чешуйчатомъ расположеніи катушекъ, обмотка остается вполнѣ симметричной и при нечетномъ числѣ паръ полюсовъ. По этой причинѣ такая обмотка и примѣняется часто. На фиг. 50 приведена подобная обмотка съ однимъ стержнемъ въ каналѣ.

Петлеобразныя обмотки съ перекрещивающимися соединеніями выполняются только при помощи вилокъ. Фиг. 51 показываетъ схему подобной трехфазной обмотки. Соединенные съ нижними ножками вилокъ болѣе короткіе стержни

(показаны пунктиромъ) группами чередуются съ длинными стержнями, соединенными съ верхними ножками вилокъ.



Фиг. 47. Петлеобразная обмотка (Сименсъ-Шуккертъ).



Фиг. 46. Фиг. 48.

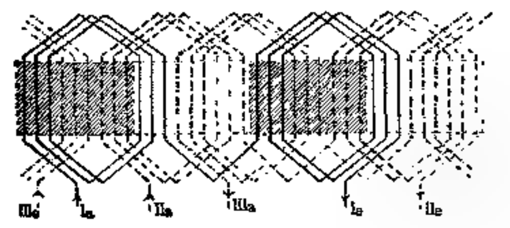
Фиг. 52 даетъ двухфазную, фиг. 53 трехфазную прямую волнообразную обмотку съ дугами, соотвѣтственно схемѣ фиг. 32. Относительно расположенія головокъ катушекъ

здѣсь можно сказать то же самое, что и для петлеобразныхъ обмотокъ съ дугами. Волнообразная обмотка удобнѣе

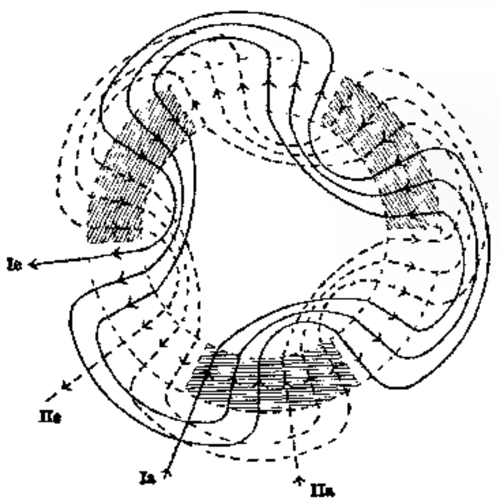
Фиг. 49. Чешуйчатая петлеобразная обмотка (Ве. Комп. Эл.)

Фиг. 50. Чешуйчатая петлеобразная обмотка (Ламейеръ).

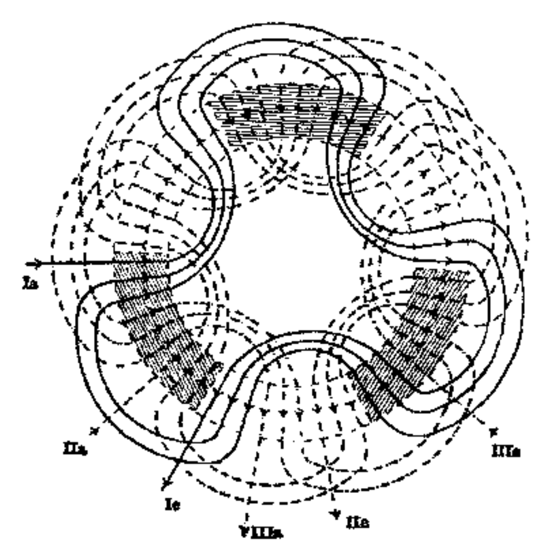
петлеобразной для случаевъ, когда въ каналѣ помѣщается по одному стержню (фиг. 54).



Фиг. 51 Петлеобразная обмотка съ вилками

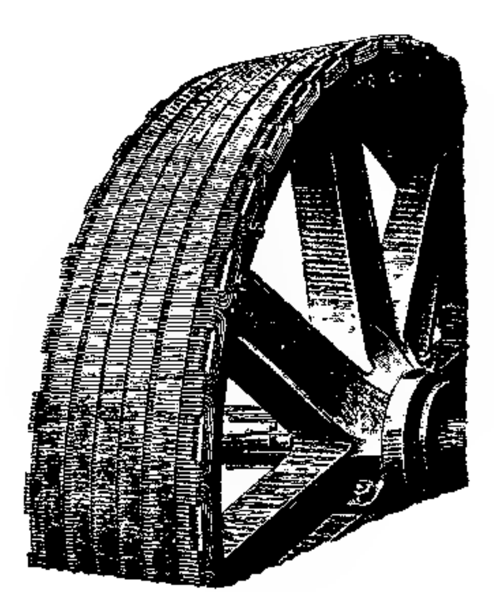


Фиг. 52 Прямая волнообразная обмотка съ дугами.



Фиг. 53. Прямая волнообразная обмотка съ дугами.

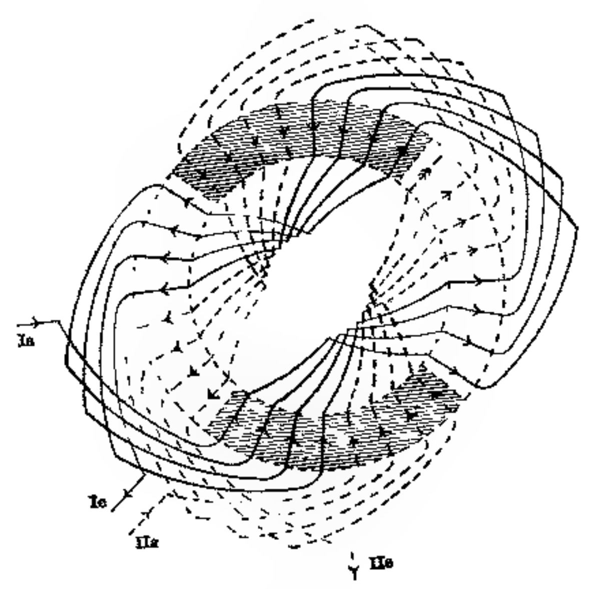
Фиг. 55 представляетъ двухфазную, а фиг. 56 трехфазную прямую волнообразную обмотку съ соединенiями вилками, соотвѣственно схемѣ фиг. 33. Какъ видно, трехфазная обмотка болѣе равномѣрна, чѣмъ двухфазная. Фиг. 57 и 58 показываютъ дѣйствительное выполненiе первой изъ нихъ. Фиг. 59 представляетъ двухфазную, а фиг. 60 трехфазную **возвратную** волнообразную обмотку съ перекрещивающимися соединенiями, соотвѣтственно схемѣ фиг. 34. Нижнiя соединительныя части обозначены пунктирными линiями.



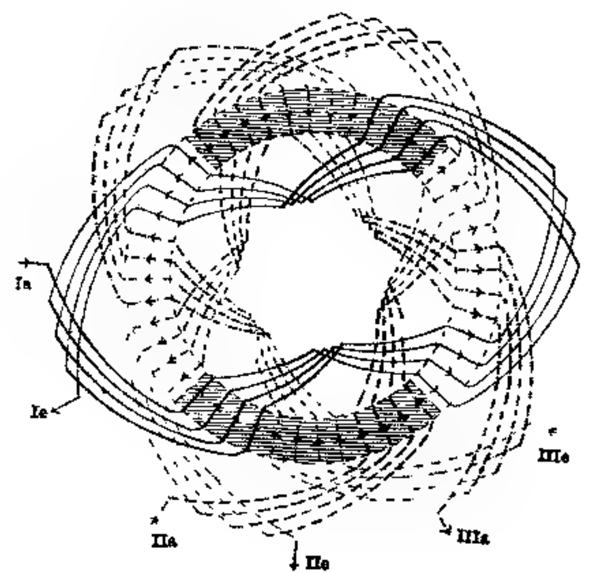
Фиг. 54. Волнообразная обмотка съ дугами (Вс. Комп. Эл.).

Фиг. 61 показываетъ дѣйствительное выполненiе этой обмотки съ соединенiями вилками (въ статорѣ и роторѣ). На фиг. 62 показанъ роторъ съ бочковидной волнообразной возвратной обмоткой. Въ трехфазныхъ обмоткахъ съ перекрещивающимися соединительными частями несимметрiи въ выполненiи не бываетъ и при нечетномъ числѣ паръ полюсовъ, а потому такiя обмотки могутъ примѣняться для двигателей съ любымъ числомъ полюсовъ. Изъ обмотки фиг. 59 или 60 легко получить шестиполюсную обмотку, разрѣзавъ ее въ A и вставивъ сюда еще часть, подобную той, что лежитъ между B и C. Изъ этой обмотки можно просто получить другую съ шестью или болѣе стержнями на полюсъ и фазу. Придется лишь обойти въ прямомъ и обратномъ направленiяхъ большее, чѣмъ два, число разъ.

Особый родъ обмотокъ представляютъ собой разрѣзанныя обмотки постояннаго тока. Какъ видно изъ фиг. 8, изъ кольцевой обмотки постояннаго тока можно полу-



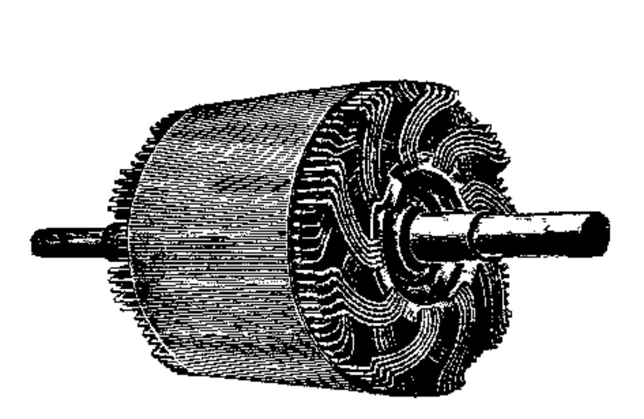
Фиг. 55 Прямая волнообразная обмотка съ вилками.



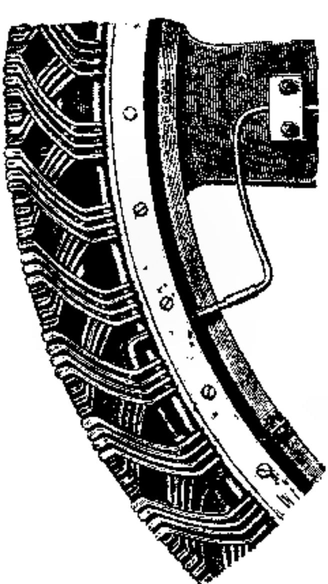
Фиг 56 Прямая волнообразная обмотка съ вилками.

чить трехфазную обмотку съ соединеніемъ фазъ треугольникомъ, если взять отвѣтвленія отъ трехъ равноотстоящихъ другъ

отъ друга точекъ. Если же разрѣзать такую обмотку въ этихъ точкахъ, то можно получить соединенie фазъ звѣздой. Фиг. 7 показываетъ, какъ, разрѣзавъ кольцевую обмотку въ шести мѣстахъ, получить трехфазную обмотку, а—въ четырехъ — двухфазную обмотку. Замкнутую обмотку трехфазнаго тока можно получить и изъ большаго числа барабанныхъ обмотокъ постояннаго тока, взявъ отвѣтвленія отъ равноотстоящихъ точекъ, являющихся для постояннаго тока точками равнаго потенціала. Такія обмотки употребляются въ преобразователяхъ.



Фиг 57 Прямая волнообразная обмотка съ вилками (Эрликонъ)

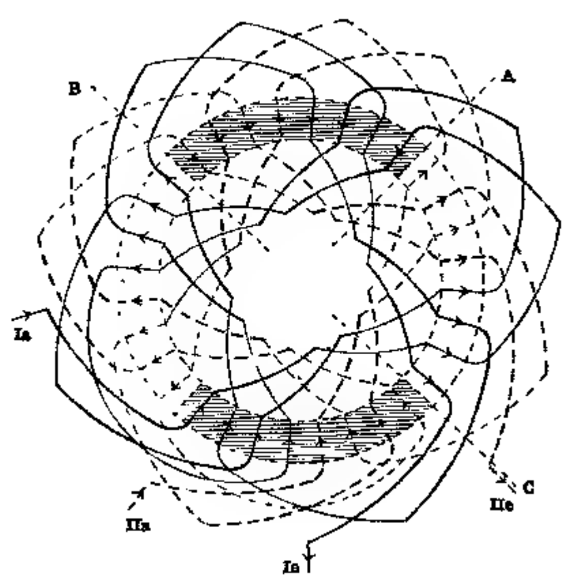


Фиг. 58. Прямая волнообразная обмотка съ вилками (Ламейеръ).

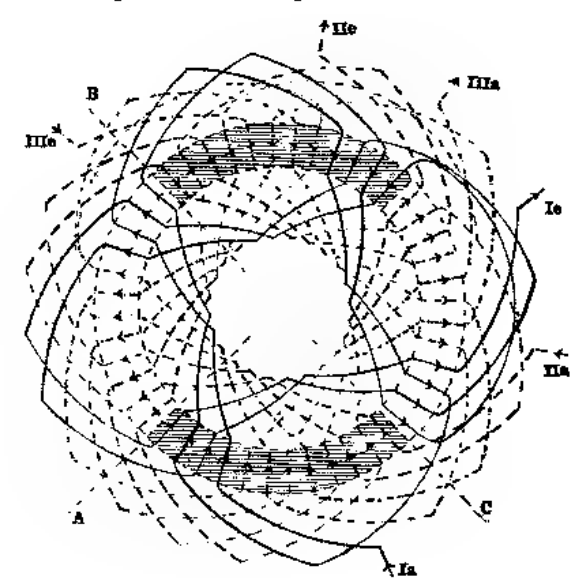
Здѣсь необходимо, чтобы общее число стержней было кратно числу фазъ и полюсовъ Если это условіе не выполнено, то въ обмоткѣ возникаютъ внутренніе токи, а у краевъ полюсовъ получаются стержни съ токами различныхъ направленій, вслѣдствіе этого двигатель съ такой обмоткой будетъ давать меньшій вращающій моментъ, чѣмъ при данномъ числѣ стержней должно было бы быть.

Такія обмотки имѣли бы еще смыслъ въ примѣненіи къ роторамъ, такъ какъ, по главѣ 10, начальный вращающій моментъ бываетъ равномѣрный въ тѣхъ случаяхъ, когда число стержней обмотки ротора некратно числа полюсовъ. Для избѣжанія же, упомянутыхъ выше, внутреннихъ токовъ, подобныя обмотки примѣняютъ лишь для соединенія фазъ звѣздой. Фиг. 63 изображаетъ такую обмотку для четырехъ полюсовъ и 46 стержней, такъ что на полюсъ приходится $11^1/_2$ стержней. Если въ каналѣ находится два стержня, то на полюсъ

приходится $5^3/_4$ зубца. Обмотка разрѣзана въ трехъ мѣстахъ. На этомъ чертежѣ видны стержни, лежащіе у краевъ полюсовъ съ противоположнымъ направленіемъ токовъ. Меньшее



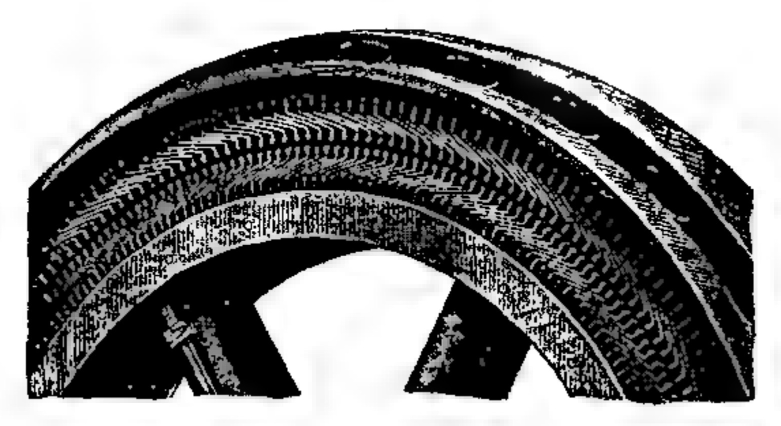
Фиг. 59. Возвратная волнообразная обмотка съ вилками



Фиг. 60. Возвратная волнообразная обмотка съ вилками.

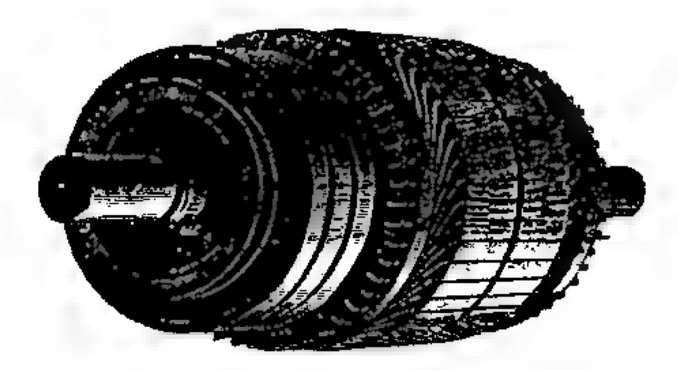
число такихъ стержней получается въ четырехполюсной обмоткѣ фиг. 64 съ 50 стержнями, которая разрѣзана въ шести

мѣстахъ. Первоначальную обмотку постояннаго тока можно узнать по чернымъ пунктирнымъ линіямъ. При разрѣзаніи образовалось 12 концовъ. Шесть изъ нихъ соединены не симметрично такъ, что изъ прямой обмотки постояннаго тока образовалась возвратная обмотка перемѣннаго тока. Другіе шесть концовъ служатъ началами и концами трехъ



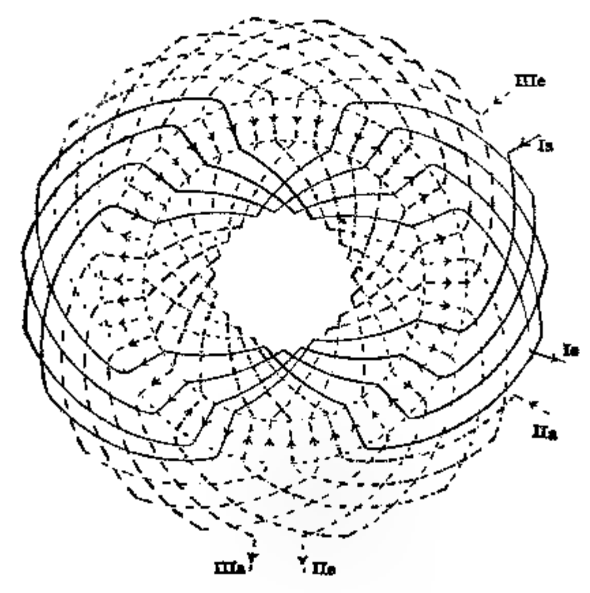
Фиг. 61. Возвратная волнообразная обмотка съ дугами (Сименсъ-Шуккертъ).

фазъ. Если разрѣзать эту обмотку въ точкѣ A и вставить сюда такую же часть обмотки, какая помѣщается между точками B и C, то получится шестиполюсная обмотка, и т. п. Подобныя обмотки нормально примѣняются рѣдко.

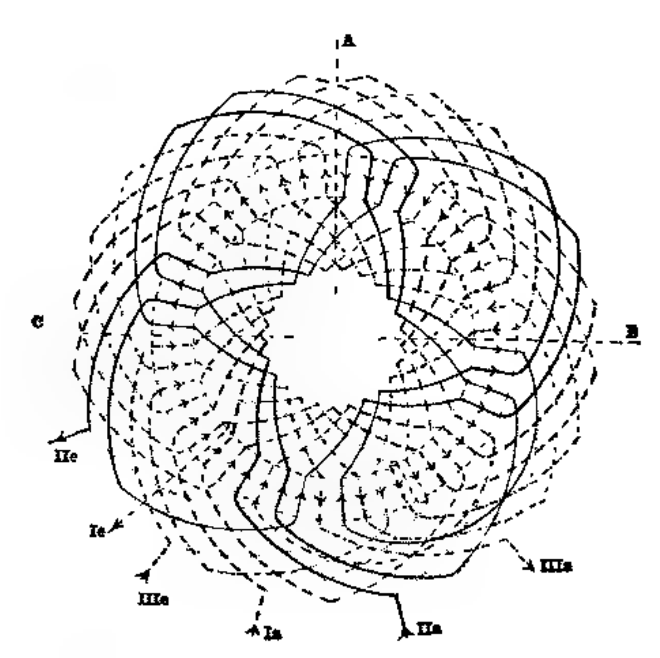


Фиг. 62. Возвратная волнообразная (бочковидная) обмотка (Вс. Комп. Эл.).

Въ большихъ двигателяхъ низкаго напряженія, гдѣ сѣченіе одного стержня недостаточно для фазнаго тока, наматываютъ для каждой пары полюсовъ самостоятельную обмотку и соединяютъ ихъ между собой параллельно. Стержней съ большими сѣченіями вообще избѣгаютъ изъ за возникающихъ въ массахъ

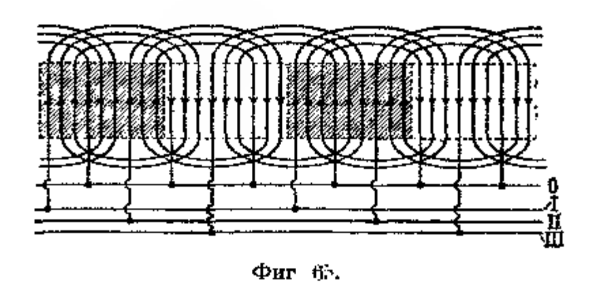


Фиг. 63. Обмотка постояннаго тока разрѣзанная въ 3-хъ точкахъ



Фиг. 64. Обмотка постояннаго тока разрѣзанная въ 6-ти точкахъ.

ихъ токовъ Фуко. Фиг. 65 показываетъ параллельное соединеніе отдѣльныхъ петлеобразныхъ обмотокъ. При этомъ обмотка соотвѣтствующая парѣ полюсовъ, очевидно, должна быть расчитана на полное напряженіе двигателя. Въ двигателяхъ съ большимъ числомъ полюсовъ можетъ быть, конечно, примѣнено послѣдовательно-параллельное соединеніе группъ полю-



Фиг 65.

совъ. Очень простое параллельное включеніе можно получить въ прямой волнообразной обмоткѣ съ дугами (фиг. 52) и (фиг. 53,). Нужно только разрѣзать обмотку на границѣ перваго и послѣдняго полюса и соединить концы параллельно. Этимъ пользуются при большихъ двигателяхъ для избѣжанія высокихъ напряженій въ обмоткѣ ротора.

Круговыя діаграммы.

15. Асинхронный двигатель какъ трансформаторъ.

Асинхронный двигатель при неподвижномъ роторѣ представляетъ ничто иное, какъ трансформаторъ, и именно, при разомкнутомъ роторѣ—ненагруженный, а при замкнутомъ на короткое—коротко-замкнутый трансформаторъ. Но и при любомъ режимѣ работы, т. е. при любомъ скольженіи, онъ несмотря на непостоянство числа періодовъ ротора, все же подобенъ трансформатору, работающему при безъиндукціонной нагрузкѣ. Это будетъ ясно изъ слѣдующаго. Изъ уравненія (11) и (13) имѣемъ

$$W_2 = m r_2 \mathfrak{I}_2^2 \frac{1-s}{s} \quad \ldots \ldots \quad (44)$$

Положивъ

$$s = \frac{r_2}{r_2 + r} \quad \ldots \ldots \quad (45)$$

получимъ

$$W_2 = mr J_2^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (46)$$

То же имѣетъ мѣсто и для m- фазнаго трансформатора, работающаго на безъиндукціонное сопротивленіе r. При холостомъ ходѣ двигателя (пренебрегая треніемъ о воздухъ, треніемъ щетокъ о кольца и—въ подшипникахъ) скольженіе $s=0$. Этому соотвѣтствуетъ, изъ равенства (45), $r=\infty$. Это значитъ, что при холостомъ ходѣ, несмотря на замкнутую обмотку ротора, двигатель соотвѣтствуетъ трансформатору съ разомкнутой вторичной цѣпью. Это въ одинаковой мѣрѣ относится и къ неподвижному двигателю съ разомкнутымъ роторомъ, а слѣдовательно въ электрическомъ отношеніи нѣтъ никакого различія, стоитъ ли двигатель при разомкнутомъ роторѣ, или работаетъ въ холостую при замкнутомъ роторѣ (безъ тренія). Въ дѣйствительности треніе всегда существуетъ, и оно служитъ двигателю нагрузкой. Въ этомъ состояніи скольженіе очень мало—и двигатель подобенъ трансформатору съ большимъ внѣшнимъ сопротивленіемъ. Если замкнуть роторъ на короткое и задерживать его, то $s=1$. По форм. (45) $s=1$, когда $r=0$, слѣдовательно такое состояніе двигателя соотвѣтствуетъ трансформатору при короткомъ замыканіи его. Вторичное напряженіе на зажимахъ трансформатора при безъиндукціонной нагрузкѣ равно

$$r\,\mathfrak{J}_2 = P_2$$

Вставивъ это выраженіе въ уравн. (26), получимъ

$$W_2 = mP_2\mathfrak{J}_2,$$

т.-е. мощность равна произведенію напряженія на зажимахъ на силу тока во всѣхъ m фазахъ, такъ же, какъ въ трансформаторѣ при безъиндукціонной нагрузкѣ. Такимъ образомъ видимъ, что асинхронный двигатель въ электрическомъ отношеніи во всемъ аналогиченъ трансформатору, работающему на безъиндукціонную нагрузку. Поэтому къ нему примѣнимы и діаграммы трансформатора.

16. Діаграмма трансформатора при безъиндукціонной нагрузкѣ.

На фиг. 66 представлена діаграмма токовъ и магнитныхъ полей трансформатора при безъиндукціонной нагрузкѣ. I_1 и I_2 суть вектора первичнаго и вторичнаго токовъ, сдвинутыхъ другъ относительно друга на уголъ φ, большій 90^0 и меньшій 180^0. Каждый токъ создаетъ одну изъ составляющихъ общаго

для обѣихъ обмотокъ потока Φ. Составляющая отъ первичнаго тока

$$\overline{OA} = \frac{0{,}4\pi I_1 w_1}{R} \qquad (47)$$

а отъ вторичнаго тока

$$\overline{OB} = \frac{0{,}4\pi I_2 w_2}{R} \qquad (48)$$

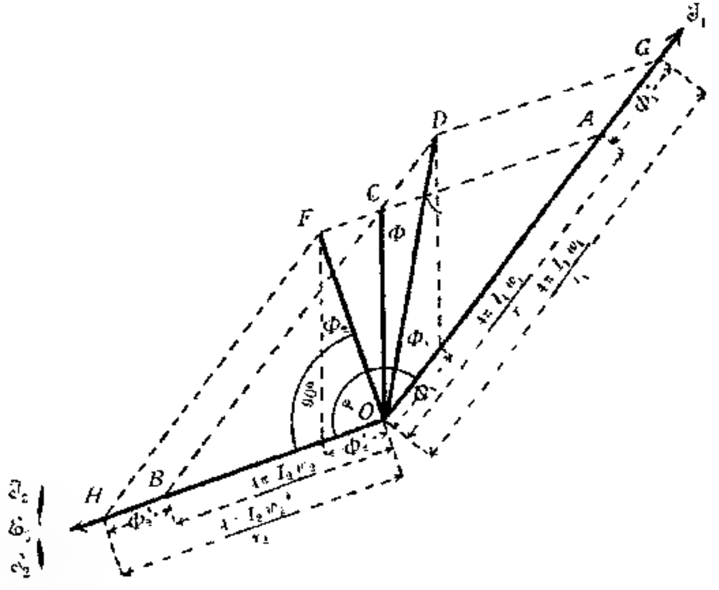
гдѣ R общее сопротивленіе магнитной цѣпи для потока Φ. Кромѣ того, первичный токъ создаетъ первичный потокъ разсѣянія

$$\Phi_1' = \frac{0{,}4\pi I_1 w_1}{R_1'} = \overline{AG} \qquad (49)$$

а вторичный токъ—вторичный потокъ разсѣянія

$$\Phi_2' = \frac{0{,}4\pi I_2 w_2}{R_2'} = \overline{BH} \qquad (50)$$

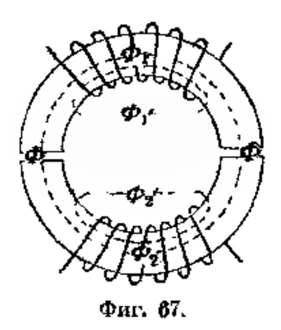
гдѣ R_1' и R_2'—сопротивленія соотвѣтственно первичному и вторичному потоку разсѣянія.



Фиг. 66.

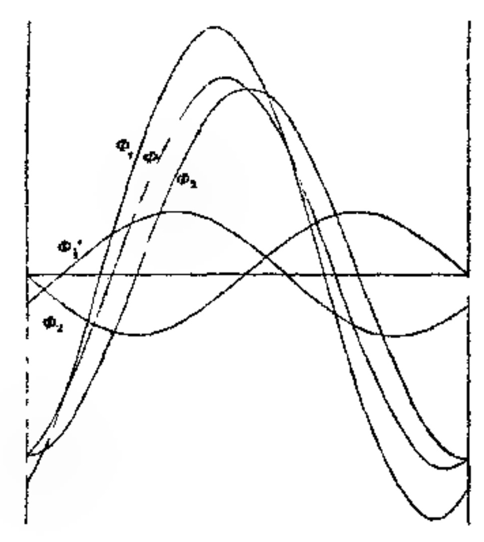
Каждый изъ этихъ потоковъ разсѣянія существуетъ самостоятельно, вслѣдствіе чего и находится въ фазѣ съ создающимъ ихъ токомъ.

Въ желѣзѣ статора проходитъ общій потокъ Φ и потокъ разсѣянія Φ_1', которые, складываясь геометрически (по правилу параллелограмма силъ), образуютъ первичный потокъ Φ_1. Въ желѣзѣ ротора накладываются потоки Φ и Φ_2' и образуютъ вторичный потокъ Φ_2.



Фиг. 67.

Потоки Φ, Φ_1', Φ_2', Φ_1, Φ_2 существуютъ въ дѣйствительности и могутъ быть обнаружены. Составляющія же $\overline{OA}$ и $\overline{OB}$ несуществуютъ самостоятельно и поэтому носятъ названіе фиктивныхъ потоковъ. На фиг. 67 показано дѣйствительное распредѣленіе потоковъ; это распредѣленіе можно получить при помощи желѣзныхъ опилокъ, если изготовить сердечникъ трансформатора по типу фиг. 67, изъ немагнитнаго матеріала и наложить первичную и вторичную обмотки отдѣльно. Фиг. 68 изображаетъ измѣненіе этихъ потоковъ во времени. Сдвигъ фазъ между ними соотвѣтствуетъ угламъ между амплитудами на діаграммѣ. Мгновенныя значенія потоковъ складываются алгебраически. Между магнитными



Фиг. 68.

сопротивленіями существуетъ такое же соотношеніе, какъ между сопротивленіями для токовъ, а именно:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_1'} \quad \ldots \ldots \ldots (51)$$

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_2'} \quad \ldots\ldots\ldots (52)$$

Умноживъ равенство (51) на $0{,}4\pi I_1 w_1$, получимъ

$$\frac{0{,}4\pi I_1 w_1}{R_1} = \frac{0{,}4\pi I_1 w_1}{R} + \frac{0{,}4\pi I_1 w_1}{R_1'}$$

И по уравн. (47) и (49)

$$\frac{0{,}4\pi I_1 w_1}{R_1} = OA + AG = OG \quad \ldots\ldots (53)$$

Умножая равенство (52) на $0{,}4\pi I_2 w_2$, получимъ подобнымъ же образомъ

$$\frac{0{,}4\pi I_2 w_2}{R_2} = OH \quad \ldots\ldots\ldots (54)$$

Отношеніе поля разсѣянія къ соотвѣтствующему фиктивному полю называется коэффиціентомъ разсѣянія Гейланда (τ_1, τ_2).

Первичный коэффиціентъ разсѣянія

$$\tau_1 = \frac{GA}{AO} = \frac{R}{R_1'} \quad \ldots\ldots\ldots (55)$$

а вторичный

$$\tau_2 = \frac{HB}{BO} = \frac{R}{R_2'} \quad \ldots\ldots\ldots (56)$$

т.-е. первичный или вторичный коэффиціентъ разсѣянія равенъ отношенію магнитнаго сопротивленія для общаго потока къ соотвѣтственнымъ сопротивленіямъ потокамъ разсѣянія.

Отношеніе всей, создаваемой первичнымъ или вторичнымъ токомъ, составляющей потока къ фиктивному потоку называется коэффиціентомъ разсѣянія Гопкинсона (v_1, v_2), слѣдовательно

$$v_1 = \frac{GO}{AO} = \frac{R}{R_1} \quad \ldots\ldots\ldots (57)$$

$$v_2 = \frac{HO}{BO} = \frac{R}{R_2} \quad \ldots\ldots\ldots (58)$$

Изъ этихъ равенствъ, на основаніи равенствъ (51) и (52), получаются соотношенія между коэффиціентами разсѣянія Гопкинсона и Гейланда

$$v_1 = R\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1'}\right) = 1 + \frac{R}{R_1'} = 1 + \tau_1 \quad \ldots (59)$$

$$v_2 = R\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R_2'}\right) = 1 + \frac{R}{R_2'} = 1 + \tau_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (60)$$

Для каждаго изъ составляющихъ потоковъ $\overline{OG}$ и $\overline{OH}$ и для потоковъ разсѣянія Φ_1' и Φ_2' будемъ различать слѣдующіе коэффиціенты самоиндукціи:

$$L_1 = \frac{4\pi w_1^2}{R_1} \qquad L_2 = \frac{4\pi w_2^2}{R_2}$$

$$L_1 = \frac{4\pi w_1^2}{R_1'} \qquad L_2 = \frac{4\pi w_2^2}{R_2'}$$

а коэф. самоиндукціи для фиктивныхъ потоковъ $\overline{OA}$ и $\overline{OB}$:

$$L_{1f} = \frac{4\pi w_1^2}{R} \qquad L_{2f} = \frac{4\pi w_2^2}{R}$$

Принимая во вниманіе ур. (51) и (52), получимъ

$$L_{1f} = 4\pi w_1^2\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'}\right) = L_1 - L_1' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (61)$$

$$L_{2f} = 4\pi w_2^2\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'}\right) = L_2 - L_2' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (62)$$

Общему потоку соотвѣтствуетъ коэффиціентъ взаимной индукціи

$$M = \frac{4\pi w_1 w_2}{R} \; .$$

Отсюда слѣдуетъ:

$$M^2 = \frac{(4\pi)^2 w_1^2 w_2^2}{R^2} = L_{1f} . L_{2f} = (L_1 - L_1')\,(L_2 - L_2') \quad . \; (63)$$

Behn-Eschenburg далъ этому соотношенію слѣдующій видъ:

$$M^2 = L_1 L_2 - \varepsilon L_1 L_2 = L_1 L_2\,(1 - \varepsilon) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (64)$$

ε — есть, слѣдовательно, коэффиціентъ разсѣянія, учитывающій совокупное вліяніе первичнаго и вторичнаго разсѣянія. Связь съ другими коэффиціентами разсѣянія получается слѣдующимъ образомъ:

$$1 - \varepsilon = \frac{M^2}{L_1 L_2} = \frac{R_1 R_2}{R^2} = \frac{1}{v_1 v_2} \, ,$$

Откуда

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{v_1 v_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (65)$$

Изъ уравн. (59) и (60) имѣемъ

$$v_1 v_2 = (1 + \tau_1)(1 + \tau_2) = 1 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 \quad . \quad . \quad (66)$$

Обозначимъ

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 = \tau \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (67)$$

Тогда

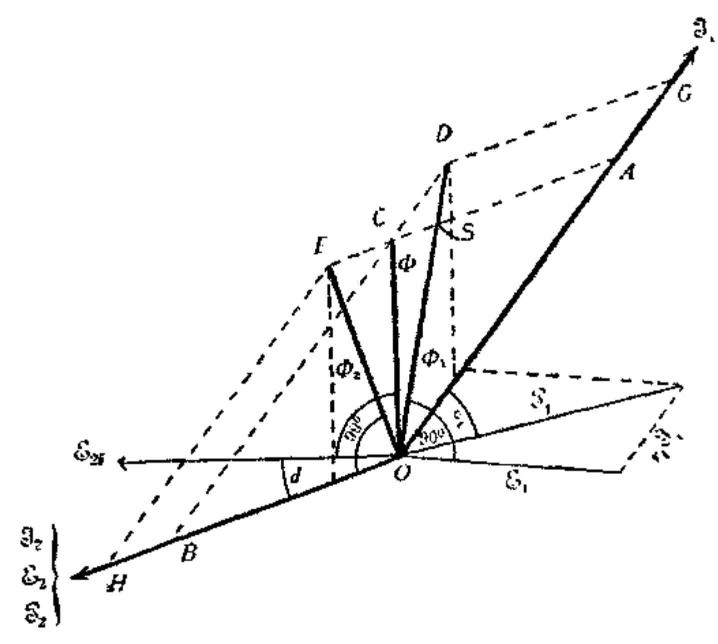
$$v_1 v_2 = 1 + \tau \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (68)$$

Коэффиціентъ τ, слѣдовательно, учитываетъ общее разсѣяніе трансформатора.

Изъ ур. (65) и (68) имѣемъ

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{1+\tau} = \frac{\tau}{1+\tau} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (69)$$

Такова зависимость между различными коэффиціентами разсѣянія, встрѣчающимися въ литературѣ.



Фиг 69.

Намъ осталось ввести еще въ діаграмму вектора напряженій. Для преодолѣнія эл.-дв. силы, индуктируемой первичнымъ потокомъ Φ, и отстающей отъ него на 90^0, необходимо напряженіе $\mathfrak{E}_1$, составляющее напряженія на зажимахъ двигателя P_1 (фиг. 69). Другой составляющей этого напряженія будетъ ваттное паденіе напряженія $r_1\mathfrak{J}_1$, находящееся въ фазѣ съ токомъ.

Напряженіе на зажимахъ F_1 является геометрической суммой этихъ векторовъ; токъ $\mathfrak{J}_1$ отстаетъ отъ напряженія P_1 на уголъ φ_1. Индуктируемая въ обмоткѣ ротора вторичнымъ потокомъ Φ_2 эл.-дв. сила $\mathfrak{E}_2$ отстаетъ отъ него на 90^0, но такъ какъ асинхронный двигатель представляетъ въ электрическомъ отношеніи трансформаторъ работающій при безъиндукціонной нагрузкѣ, то вторичный токъ $\mathfrak{J}_2$ и вторичное напряженіе P_2 совпадаютъ съ $\mathfrak{E}_2$.

Слѣдуетъ различать эл.-дв. силу $\mathfrak{E}_2$, индуктируемую потокомъ Φ_2 и, неудачно называемую вторичной эл.-дв. силой, эл.-дв. силу $\mathfrak{E}_{2i}$, индуктируемую въ обмоткѣ ротора общимъ потокомъ Φ; $\mathfrak{E}_{2i}$ направлена перпендикулярно къ Φ. Эту эл.-дв. силу мы ввели въ формулы для вращающаго момента въ главѣ 8. Токъ $\mathfrak{J}_2$, эл.-дв. сила $\mathfrak{E}_2$ и напряженіе на зажимахъ P_2 отстаютъ отъ $\mathfrak{E}_{2i}$ на уголъ δ.

17. Круговая діаграмма Гейланда.

Мы видѣли, что асинхронный двигатель при любомъ состояніи работы соотвѣтствуетъ трансформатору при безъиндукціонной нагрузкѣ. Уголъ BOF, слѣдовательно, постояненъ и равенъ прямому, и геометрическія мѣста нѣкоторыхъ точекъ діаграммы суть окружности. Этимъ впервые воспользовался Гейландъ для построенія круговой діаграммы, принесшей большую пользу для развитія трехфазнаго асинхроннаго двигателя.

Для построенія подобной діаграммы поступимъ слѣдующимъ образомъ.

Проведемъ черезъ точку A на фиг. 66 прямую параллельную OF до пересѣченія съ продолженіемъ OD въ точкѣ T (фиг. 70). Тогда получимъ, какъ это видно изъ фиг. 66 и 70, слѣдующія соотношенія:

$$\frac{\overline{CS}}{\overline{SA}} = \frac{\overline{DS}}{\overline{SO}} = \frac{\overline{GA}}{\overline{AO}} = \frac{\dfrac{4\pi I_1 w_1}{R_1'}}{\dfrac{4\pi I_1 w_1}{R}} = \frac{R}{R_1'} = \tau_1 \quad . \quad . \quad . \quad (70)$$

$$\frac{\overline{FC}}{\overline{CA}} = \frac{\overline{FC}}{\overline{BO}} = \frac{\dfrac{4\pi I_2 w_2}{R_2}}{\dfrac{4\pi I_2 w_2}{R}} = \frac{R}{R_2'} = \tau_2 \quad . \quad . \quad . \quad (71)$$

$$\frac{\overline{AC}}{\overline{AS}} = \frac{\overline{AS} + \overline{OS}}{AS} = 1 + \frac{\overline{CS}}{SA} = 1 + \tau_1 \quad . \quad . \quad . \quad (72)$$

$$\frac{AF}{AC}=\frac{AC+CF}{AC}=1+\frac{FC}{CA}=1+\tau_2 \quad . \quad . \quad . \quad (73)$$

$$\frac{AC}{AS}\cdot\frac{AF}{AC}=\frac{AF}{AS}=(1+\tau_1)(1+\tau_2)=1+\tau_1+\tau_2+\tau_1\tau_2 \quad . \quad (74)$$

Изъ ур. (67) имѣемъ $\tau_1+\tau_2+\tau_1\tau_2=\tau$

Откуда

$$\frac{AF}{AS}=1+\tau \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (75)$$

Изъ фиг. (70) имѣемъ:

$$\frac{AF}{AS}=\frac{AS+SF}{AS}=1+\frac{SF}{AS}$$

Изъ подобія $\triangle\triangle$ SFO и AST получаемъ:

$$\frac{SF}{AS}=\frac{SO}{ST}=\tau \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (76)$$

Магнитныя сопротивленія R и R_1' зависятъ отъ размѣровъ двигателя и отъ магнитной проницаемости μ желѣза и воздуха. Такъ какъ эти величины одинаковы для R и R_1', то въ отношеніе $\frac{R}{R_1'}$ они и не войдутъ; откуда получается, что τ_1 зависитъ только отъ соотношенія размѣровъ машины.

То же самое относится и къ τ_2. Такъ какъ τ зависитъ только отъ τ_1 и τ_2, то и τ, а слѣдовательно и $\frac{SO}{ST}$, зависитъ только отъ соотношенія размѣровъ двигателя. Для даннаго двигателя, так. образомъ, τ и $\frac{SO}{ST}$ постоянны. Сами же отрѣзки SO и ST при постоянной первичной эл.-дв. силѣ постоянны; углы OFS и SAT прямые, а слѣдовательно окружности, описанныя на SO и на ST, какъ на діаметрахъ, пройдутъ: первая черезъ F, а вторая—черезъ A, т.-е. онѣ суть геометрическія мѣста концовъ векторовъ OF и OA. Изъ фиг. 66

$$OA=\frac{4\pi I_1 w_1}{R}$$

пропорціонально первичному току. Итакъ, мы получили діаграмму, въ которой прямая, проведенная изъ центра O до пересѣченія съ окружностью, представляетъ собою величину пропорціональную первичному току $\mathfrak{J}_1$.

Разсмотримъ крайніе теоретически возможные случаи, а именно, когда вторичное сопротивленіе равно безконечности и—нулю. Первый случай имѣетъ мѣсто, когда двигатель стоитъ, и обмотка ротора разомкнута, или—при холостомъ ходѣ безъ всякаго тренія,—когда роторъ вращается синхронно съ полемъ. При этихъ условіяхъ вторичный токъ равенъ нулю, а, слѣдовательно, нѣтъ и вторичнаго потока разсѣянія. Вслѣдствіе этого вторичный потокъ Φ_2 совпадаетъ съ общимъ потокомъ Φ, а амплитуда первичнаго потока равна алгебраической суммѣ амплитудъ общаго поля и первичнаго поля разсѣянія:

$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_1';$$

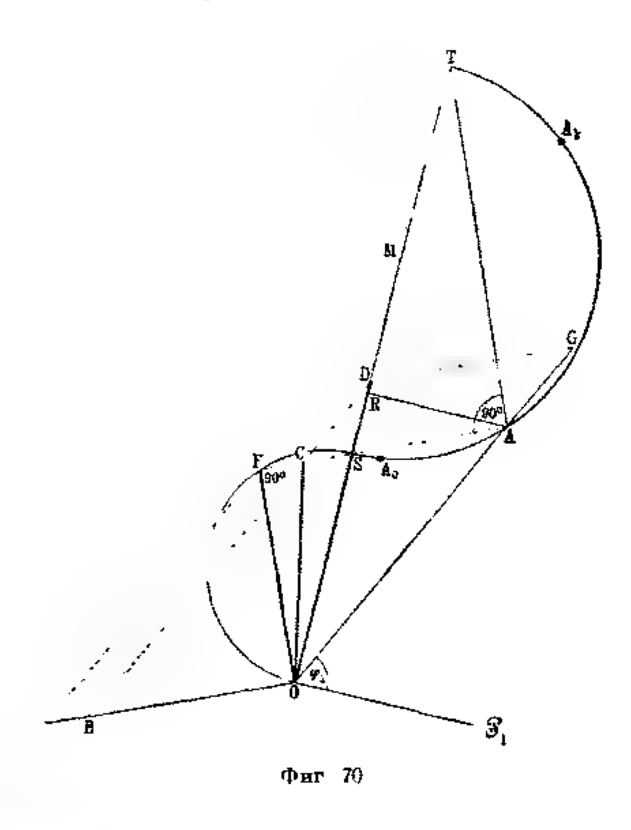
на діаграммѣ, при этомъ, точка C совпадаетъ съ S. Вслѣдствіе этого точка G совпадаетъ съ D, а A—съ S. Слѣдовательно, вся діаграмма совмѣщается въ линію OD. Въ другомъ крайнемъ случаѣ, когда вторичное сопротивленіе равно нулю, т. е. роторъ двигателя удерживается неподвижнымъ, сдвигъ фазъ φ между первичнымъ и вторичнымъ токомъ равенъ 180^0. Это возможно лишь тогда, когда общее поле Φ равно нулю и $\Phi_1 = \Phi_1'$ т. е. весь первичный потокъ представляетъ собою потокъ разсѣянія. Въ этомъ случаѣ точка C совпадаетъ съ O и точка A и G лежатъ на продолженіи OD. Діаграмма и въ этомъ случаѣ сливается въ одну прямую линію.

Такъ какъ въ обоихъ крайнихъ случаяхъ векторъ OA первичнаго тока совпадаетъ съ линіей OD, то уголъ $\varphi_1 = 90^0$. Послѣднее возможно при отсутствіи въ двигателѣ потерь въ желѣзѣ и въ мѣди. Въ дѣйствительности этого не можетъ быть, а потому концы векторовъ первичнаго тока при холостомъ ходѣ при разомкнутомъ роторѣ и при короткомъ замыканіи лежатъ не на прямой OD, а попадаютъ въ точки A_o и A_k (фиг. 70). Второй предѣльный случай не имѣетъ мѣста на практикѣ еще и потому, что при короткомъ замыканіи ротора сопротивленіе обмотки его не равно нулю. Точка A_k, слѣдовательно, лежитъ далеко отъ T. При всякихъ нагрузкахъ двигателя конецъ вектора первичнаго тока лежитъ на окружности между A_o и A_k.

При увеличеніи нагрузки отъ холостого хода до остановки точка C будетъ подвигаться отъ A_o до A_k.

Предположеніе постоянства первичной эл.-дв. силы $\mathfrak{E}$ не соотвѣтствуетъ дѣйствительности, такъ какъ обыкновенно постояннымъ является напряженіе на зажимахъ двигателя. Эл.-дв. сила же уменьшается тѣмъ больше, чѣмъ больше паденіе напряженія въ статорѣ, т. е. чѣмъ больше первичная сила тока. Дѣйствительныя геометрическія мѣста точекъ C, F, A не будутъ полуокружностями. Опытъ, однако, показываетъ, что эта діаграмма даетъ достаточно точные результаты и для постояннаго напряженія, если разсматривать E_1, какъ векторъ напряженія P_1 и соотвѣтственно уголъ AOP_1, какъ первичную

разность фазъ φ_1[1]). Если опустить перпендикуляръ изъ точки A на діаметръ ST, то отрѣзки AR и RO будутъ составляющими вектора тока AO. Первый изъ нихъ параллеленъ вектору напряженія P_1 и, слѣдовательно, находится въ фазѣ съ нимъ. Онъ представляетъ ваттный токъ $\mathfrak{J} \cos\varphi_1$. Отрѣзокъ RO, перпендикулярный къ P_1, представляетъ безваттный токъ $\mathfrak{J}_1 \sin\varphi_1$. Слѣдовательно, при теоретическомъ холостомъ ходѣ весь токъ безваттный и служитъ для созданія магнитнаго поля Φ_1, которое по нашему предположенію постоянно. OS является.



Фиг 70

[1]) Осанна (Zeitschr f. Elektrotechnik 1890, стр. 223) построилъ полную діаграмму, принимая во вниманіе паденіе напряженія въ статорѣ, т. е. для постояннаго приложеннаго напряженія. Но эта діаграмма сравнительно съ обычной, построенной для постоянной эл.-дв. силы очень сложна, и, какъ показало точное изслѣдованіе, даетъ результаты не лучше, чѣмъ обычная. Вообще всѣ графическіе методы суть методы приближенные, строго справедливые лишь для синусоидальныхъ тока, напряженія и полей. Послѣднее не имѣетъ мѣста даже и въ томъ случаѣ, если кривая напряженія синусоида, вслѣдствіе того, что кривая намагничиванія не прямая линія

такимъ образомъ, постояннымъ намагничивающимъ токомъ, который мы назовемъ черезъ $\mathfrak{J}_o$.

По фиг. 66 имѣемъ

$$AC = OB = \frac{0{,}4\pi I_2 w_2}{R},$$

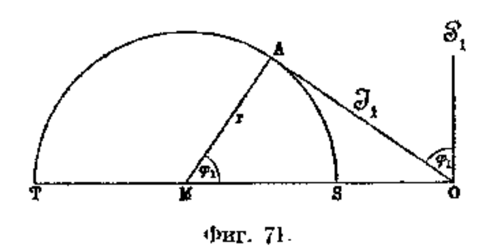
т.-е. AC пропорціоналенъ вторичной силѣ тока и отложенъ въ томъ же масштабѣ, какъ и OA, при условіи равенства чиселъ витковъ статора и ротора ($w_1 = w_2$). Въ противномъ случаѣ масштабы обратно пропорціональны числамъ витковъ. При теоретическомъ короткомъ замыканіи, когда A совпадаетъ съ T и C съ O, числа первичныхъ и вторичныхъ ампервитковъ равны. Это справедливо и при дѣйствительномъ короткомъ замыканіи A_k и приблизительно справедливо для наибольшей нормальной нагрузки. Послѣднее соображеніе очень важно при расчетѣ двигателя, такъ какъ, имѣя вторичный токъ и сопротивленіе ротора, мы получимъ потери въ мѣди ротора, а помимъ, изъ ур. (11), опредѣлимъ скольженіе, соотвѣтствующее данной нагрузкѣ. Изъ подобія треугольниковъ AOS и CDS (фиг. 70) имѣемъ, что AS пропорціоналенъ вторичному току $\mathfrak{J}_2$, но въ иномъ масштабѣ. Этотъ масштабъ опредѣлится изъ первичнаго тока при короткомъ замыканіи или при наибольшей нормальной нагрузкѣ, такъ какъ числа ампервитковъ при этомъ приблизительно одинаковы (см. гл. 31 и 40).

Для построенія діаграммы даннаго двигателя нужно имѣть по крайней мѣрѣ двѣ точки окружности. Удобно брать для этого точку холостого хода A_0 и короткаго замыканія A_k. Изъ середины прямой, соединяющей эти двѣ точки возставляютъ перпендикуляръ до пересѣченія съ основной линіей (OT). Чтобы не вычислять угла φ_1, для нанесенія точекъ A_o и A_k вычисляютъ ваттную составляющую тока $\mathfrak{J}_1 \cos\varphi_1$ дѣленіемъ подводимой мощности на напряженіе у зажимовъ и проводятъ прямую параллельную OT на разстояніи этой составляющей. Точки A^o и A_k находятся пересѣченіемъ этой параллели съ окружностями радіусовъ $\mathfrak{J}_o$ и $\mathfrak{J}_k$. Для построенія діаграммы разсчитываемаго двигателя, нужно вычислить τ_1, τ_2 и τ. Тогда будетъ извѣстно отношеніе $\frac{SO}{ST}$. На ST, какъ на діаметрѣ, строимъ полуокружность. Для опредѣленія масштаба необходимо знать только намагничивающій токъ OS (относительно его расчета см. главу 38).

18. Наибольшій коэффиціентъ мощности.

Изъ разсмотрѣнной діаграммы можно найти соотношеніе между токомъ статора OA и угломъ сдвига фазы его φ_1, косинусъ котораго представляетъ коэффиціентъ мощности. На фиг. 71 изображена полуокружность съ векторомъ тока $\mathfrak{J}_1$ и

напряженіемъ P_1. Если прослѣдить измѣненіе угла φ_1 при возрастаніи нагрузки отъ холостого хода до остановки двигателя, то увидимъ, что онъ сначала уменьшается, достигаетъ наименьшей величины, когда векторъ тока становится касательнымъ къ окружности, затѣмъ увеличивается. Соотвѣтственно этому коэффиціентъ мощности увеличивается, достигаетъ максимума и снова уменьшается. На фиг. 21 изображена кривая зависимости $\cos\varphi_1$ отъ мощности, а на фиг. 22—отъ скольженія для 2-хъ сильнаго двигателя. Наибольшая величина $\cos\varphi_1$ соотвѣтствуетъ 2,8 лош. с. и 0,1 скольженія.



Фиг. 71.

Изъ фиг. 71 получается простое соотношеніе между наибольшимъ коэффиціентомъ мощности $\cos\varphi_{1(max)}$ и коэффиціентомъ разсѣянія. Такъ какъ касательная перпендикулярна къ радіусу, то изъ $\triangle OAM$ имѣемъ:

$$\cos\varphi_{1(\max)} = \frac{MA}{MO} = \frac{r}{r+SO} = \frac{1}{1+\frac{SO}{r}}$$

и такъ какъ

$$\frac{SO}{r} = \frac{SO}{\frac{ST}{2}} = 2\frac{SO}{ST} = 2\tau,$$

то

$$\cos\varphi_{1(\max)} = \frac{1}{1+2\tau} \quad \ldots\ldots (77)$$

Итакъ, наибольшій коэффиціентъ мощности зависитъ исключительно отъ общаго разсѣянія двигателя и онъ тѣмъ больше, чѣмъ разсѣяніе меньше.

19. Вращающій моментъ и мощность.

Если мы временно пренебрежемъ потерями въ желѣзѣ, то вся энергія, подводимая къ статору, за вычетомъ тепловыхъ потерь въ немъ, будетъ передаваться ротору. Мощность подводимая къ статору пропорціональна отрѣзку AR (фиг. 70).

Передаваемую ротору мощность W_1 получимъ, вычитая тепловыя потери $r_1\mathfrak{J}_1^2$ изъ отрѣзка AR. Раздѣливъ полученную разность на угловую скорость ω_1, получимъ вращающій моментъ M. Это вычитаніе можетъ быть произведено графически, при чемъ AR слѣдуетъ уменьшить на величину, пропорціональную потерямъ, или при постоянномъ r_1, пропорціональную $\mathfrak{J}_1^2$. Пусть этотъ отрѣзокъ будетъ AH (фиг. 72). Докажемъ, что онъ пропорціоналенъ $\mathfrak{J}_1^2$. Проведя черезъ H прямую параллельную OT до пересѣченія съ AT, получимъ треугольникъ AHG, подобный треугольнику SRA, такъ какъ оба они прямоугольные и углы при G и A равны между собой. Изъ треугольника ORA:

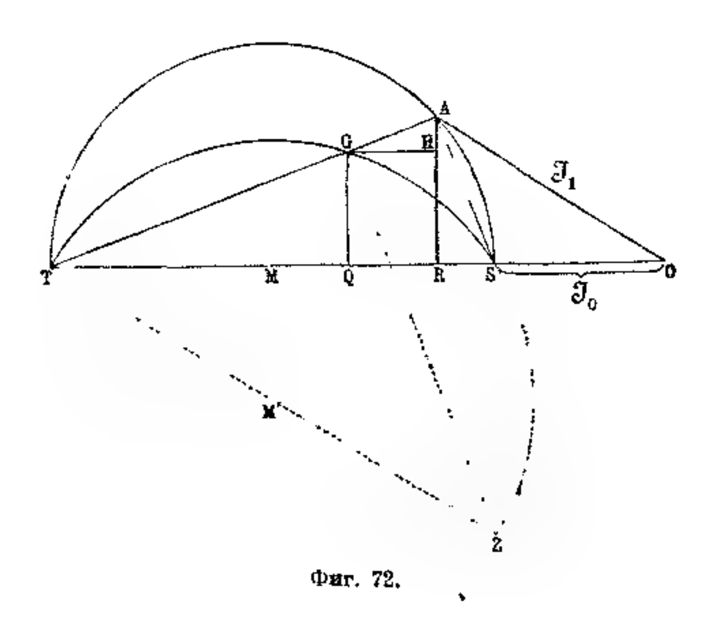
$$\mathfrak{J}_1^2 = AR^2 + (\mathfrak{J}_0 + SR)^2 = AR^2 + \mathfrak{J}_0^2 + 2\mathfrak{J}_0 SR + SR^2.$$

Далѣе

$$AR^2 + SR^2 = AS^2,$$

Откуда

$$\mathfrak{J}_1^2 = AS^2 + \mathfrak{J}_0^2 + 2\mathfrak{J}_0 SR\,.$$



Фиг. 72.

Изъ треугольника AST имѣемъ

$$AS^2 = ST\,.\,SR\,,$$

и по уравненію (76)

$$AS^2 = \frac{\mathfrak{J}_0}{\tau}\,.\,SR\,,$$

поэтому

$$\mathfrak{J}_1^2 = \frac{\mathfrak{J}_o}{\tau} \cdot SR + \mathfrak{J}_o^2 + 2\mathfrak{J}_o . SR ,$$

откуда

$$SR = \frac{\mathfrak{J}_1^2 - \mathfrak{J}_o^2}{\mathfrak{J}_o\left(\frac{1}{\tau} + 2\right)}.$$

Пренебрегая въ числителѣ величиной $\mathfrak{J}_o^2$ сравнительно съ $\mathfrak{J}_1^2$, получимъ, что RS, а слѣдовательно и AH, пропорціонально $\mathfrak{J}_1^2$, такъ какъ всѣ остальныя величины постоянны. При малыхъ нагрузкахъ квадратомъ $\mathfrak{J}_o$ пренебречь нельзя. Однако ошибка, которая получается отъ допущенія, что AH равно $r_1\mathfrak{J}_1^2$ можетъ быть отчасти исправлена. Какъ упомянуто на стр 59 діаграмма построена въ предположеніи постоянства эл.-дв. силы $\mathfrak{E}_1$. Но на практикѣ мы имѣемъ постоянное напряженіе у зажимовъ, т. е. эл.-дв. сила съ возрастаніемъ силы тока уменьшается, вслѣдствіе омическаго паденія напряженія. Особенно значительно паденіе напряженія въ опытѣ короткаго замыканія, служащаго для построенія діаграммы; проистекающая отъ этого ошибка въ большей своей части компенсируется ошибкой отъ пренебреженія токомъ $\mathfrak{J}$.

Если выразить AH въ ваттахъ и въ томъ же масштабѣ, какъ AR, то HR или GQ будутъ пропорціональны вращающему моменту выраженному въ ваттахъ. Остается только найти геометрическое мѣсто точекъ G, по которому можемъ опредѣлить вращающій моментъ для любой нагрузки. При теоретическомъ холостомъ ходѣ (S) и короткомъ замыканіи (T) вращающій моментъ равенъ нулю. Проведя окружность черезъ точки T, G, S, получимъ искомое геометрическое мѣсто. Дѣйствительно GZ параллельно AS, такъ какъ $\measuredangle TGZ = \measuredangle TAS$, какъ вписанные въ полуокружность прямые. Отсюда $\measuredangle QGZ = \measuredangle RAS = \measuredangle HGA$.

Это справедливо для любого положенія точки A на этой окружности, и слѣдовательно TFS — геометрическое мѣсто точки G.

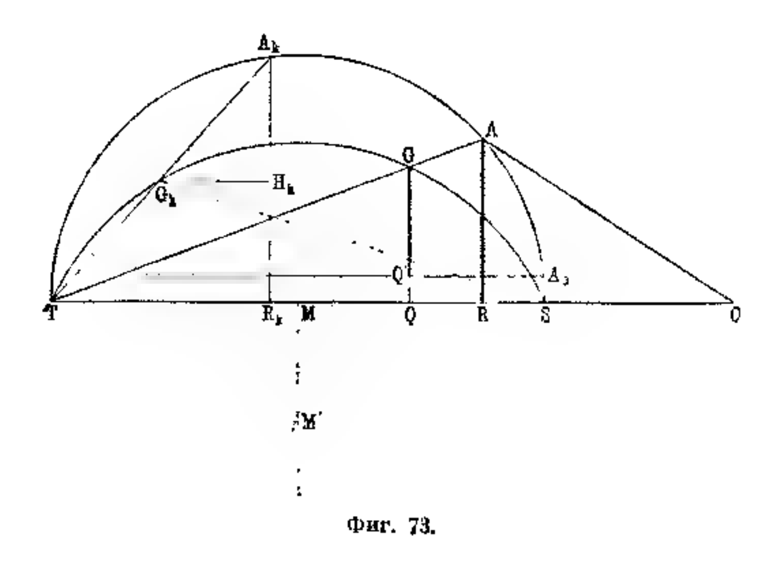
Вращающій моментъ, такимъ образомъ, изобразится перпендикуляромъ, опущеннымъ изъ точки пересѣченія этой окружности съ AT на OT. Для построенія этой окружности нужно знать одну изъ точекъ ея. Для построенія круга токовъ $\mathfrak{J}_1$, мы пользуемся опытомъ короткаго замыканія (точка A_k); если отложить отъ точки A_k въ масштабѣ (въ ваттахъ) величину $AR = mr_1\mathfrak{J}_k^2$ на прямой A_kR_k (фиг. 73), получимъ точку H_k. Проведя черезъ H_k прямую параллельную OT до пересѣченія съ прямой A_kT, получимъ точку G_k искомой окружности. Центръ ея M' опредѣляется пересѣченіемъ перпендикуляровъ, возстановленныхъ изъ серединъ хордъ G_kS и TS.

Примемъ теперь еще во вниманіе потери въ желѣзѣ и потери на треніе.

Такъ какъ потери эти переходятъ въ теплоту, то онѣ не могутъ вліять на вращающій моментъ (за исключеніемъ незначительнаго момента, вызываемаго токами Фуко и гистерезисомъ, см. гл. 11).

Слѣдовательно для полученія полезнаго вращающаго момента двигателя необходимо уменьшить перпендикуляръ GQ на величину этихъ потерь.

Въ виду того, что при измѣненіи нагрузки двигателя отъ холостого хода до полной число оборотовъ его нормально измѣняется не болѣе, чѣмъ на 6%, то потери на треніе о воздухъ и въ подшипникахъ можно считать постоянными. Предполагая, что двигатель работаетъ при постоянномъ напря



Фиг. 73.

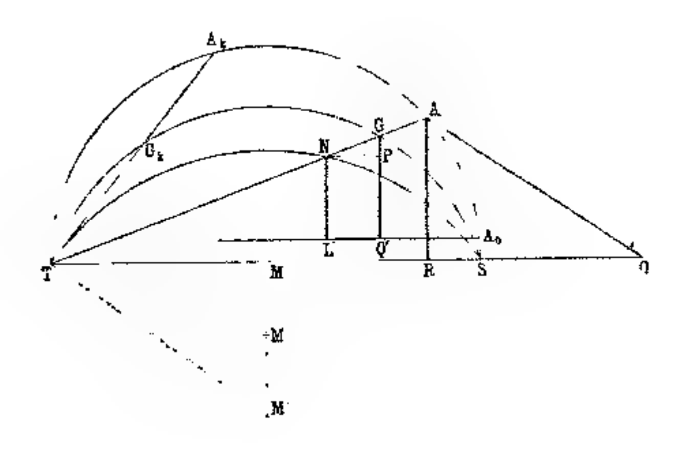
женіи на его зажимахъ, можно и потери въ желѣзѣ считать постоянными [1]). Прибавляя сюда еще потери въ мѣди отъ намагничивающаго тока, незначительно отличающагося отъ тока холостого хода, получимъ общія потери, близкія къ потерямъ холостого хода. Мы можемъ ихъ учесть разъ навсегда, проведя черезъ точку A_0 прямую, параллельную ST (фиг. 73), и отмѣрять вращающій моментъ отъ нея. Дѣйствительный вращающій моментъ получимъ равнымъ GQ' въ ваттахъ, если измѣримъ это разстояніе въ томъ же масштабѣ, что и AR и раздѣлимъ на угловую скорость ω_1. Такъ какъ мы приняли во вниманіе тре-

[1]) Слѣдуетъ добавить, что паденіе напряженія въ обмоткѣ статора въ предѣлахъ нормальной нагрузки двигателя обычно не велико, такъ какъ потери въ желѣзѣ пропорціональны эл.-дв. силѣ, а не напряженію на зажимахъ *Прим. редактора*

ніе, то GQ' представляетъ моментъ, соотвѣтствующій не дѣйствительной мощности W_2, а полезной W_n. Для полученія перваго проводимъ прямую параллельную ST внизу отъ нея на разстояніи величины потерь въ желѣзѣ и въ мѣди при холостомъ ходѣ.

Полезная мощность двигателя W_n можетъ быть такъ же получена непосредственно изъ діаграммы.

Передаваемая ротору мощность GQ' распадается на двѣ части. на потери въ мѣди ротора $m_2 r_2 \mathfrak{J}_2^2$ и полезную мощность. Первыя представлены на діаграммѣ фиг. 74 отрѣзкомъ GP, а слѣдовательно полезная мощность пропорціональна отрѣзку PQ' или NL'. Теперь легко доказать, что геометрическимъ мѣстомъ для точекъ N является такъ же окружность, проходящая черезъ точки S и T Такъ какъ полезная мощность при теоратическомъ холостомъ ходѣ и корот-



Фиг 74.

комъ замыканіи равна нулю, то окружность пройдетъ черазъ точки S и T. Но полезная мощность равна нулю и при дѣйствительномъ короткомъ замыканіи. Итакъ, если съ возрастаніемъ нагрузки до остановки двигателя точка A перемѣстится въ A_k, а—G въ—G_k, то N по внутренней окружности перейдетъ въ T, такъ какъ всѣ три точки лежатъ на одной прямой. Точка N должна совпасть съ T и находиться на TA. Это возможно, когда TA касательна къ кругу въ точкѣ T. Центръ круга M' находится, слѣдовательно, на пересѣченіи перпендикуляровъ, возстановленныхъ къ касательной въ точкѣ T и къ TS изъ ея середины. Измѣряя NL' въ масштабѣ AR, получимъ полезную мощность въ ваттахъ.

Для полученія дѣйствительной мощности W_2 необходимо, какъ и для вращающаго момента, провести параллель къ ST

внизу отъ нея на разстояніи величины суммы потерь въ желѣзѣ и въ мѣди, соотвѣтствующихъ холостому ходу.

20. Скольженіе.

Скольженіе можетъ быть также найдено изъ діаграммы. Въ главѣ 15 мы видѣли, что асинхронный двигатель въ электрическомъ отношеніи совершенно подобенъ трансформатору при безъиндукціонной нагрузкѣ. Поэтому вторичный токъ

$$\mathfrak{J}_2 = \frac{\mathfrak{E}_2}{r_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (78)$$

гдѣ $\mathfrak{E}_2$ электродвижущая сила, индуктируемая вторичнымъ потокомъ Φ_2. Тогда

$$\mathfrak{E}_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \; c_2 w_2 \Phi_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (79)$$

и по ур. (5)

$$\mathfrak{E}_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \; c_1 s w_2 \Phi_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (88)$$

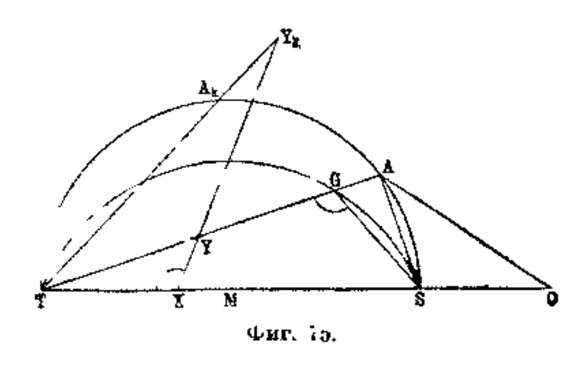
и

$$\mathfrak{J}_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}\, r_2} \; c_1 s w_2 \Phi_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (81)$$

Откуда

$$s = K \frac{\mathfrak{J}_2}{\Phi_2}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (82)$$

гдѣ K—коэффиціентъ пропорціональности.



Фиг. 75.

Какъ мы видѣли въ главѣ 17, отрѣзокъ SA пропорціоналенъ $\mathfrak{J}_2$, и—AT пропорціоналенъ Φ_2 (фиг. 75), слѣдовательно скольженіе пропорціонально отношенію этихъ отрѣзковъ, при отсутствіи паденія напряженія въ статорѣ. При существованіи же па-

денія напряженія, скольженіе, по сказанному въ предыдущей главѣ, опредѣляется точкой G, т. е. оно пропорціонально $\frac{SG}{GT}$.

Проведемъ линію XY такъ, чтобы $\measuredangle\, TXY = \measuredangle\, TGS$. Тогда треугольники TXY и TGS подобны, и скольженіе s пропорціонально отношенію $\frac{XY}{XT}$. Но такъ какъ XT постоянно, а съ перемѣщеніемъ точки A мѣняется только XY, то скольженіе пропорціонально XY. Для установленія масштаба вспомнимъ, что при точкѣ короткаго замыканія A_k скольженіе равно 1. Поэтому кродолжимъ прямую XY допересѣченія съ TA_k въ точкѣ Y_k. Отрѣзокъ XY_k — есть единица масштаба для скольженія. Удобнѣе всего сдѣлать этотъ отрѣзокъ равнымъ еданицѣ длины, проведя прямую параллельную XY такъ, чтобы ея длина XY_k равнялась, напримѣръ, 1 метру. Если тогда при какой-либо нагрузкѣ отрѣзокъ XY равенъ 2 см., то скольженіе равно 0,02 или 2%.

Можно еще проще получить положеніе линіи скольженія, зная, по ур. (82), что она прямая. При возрастаніи нагрузки отъ холостого хода до остановки двигателя точка A движется отъ S къ A_k, при этомъ скольженіе растетъ отъ 0 до 1. Если вращать двигатель въ противоположную сторону (ω_2—отрицательно), то скольженіе станетъ больше единицы. При возрастаніи его до безконечности, по ур. (26), вращающій моментъ (для $s = \infty$) равенъ нулю. Такъ какъ послѣдній на діаграммѣ изображается перпендикуляромъ, опущеннымъ изъ точки G, то онъ обратится въ нуль при совпаденіи точекъ G и T. При этомъ векторъ TA, на которомъ лежатъ G, станетъ касательнымъ къ кругу вращающихъ моментовъ въ точкѣ T. Такъ какъ для момента, равнаго нулю, скольженіе равно ∞, а при короткомъ замыканіи (A_k) равно единицѣ, то линія скольженія должна пересѣчься съ касательной къ кругу въ безконечности, т. е. быть ей параллельной, а въ пересѣченіи съ TA_k—дать отрѣзокъ, равный единицѣ. Это будетъ прямая XY_k.

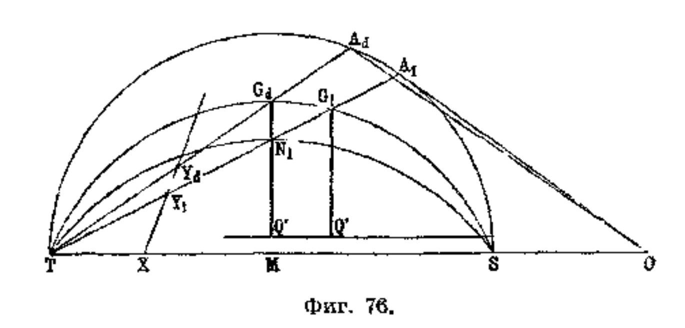
Итакъ, линію скольженія можно найти, не строя угла при X. Нужно только провести касательную къ кругу вращ. моментовъ въ точкѣ T и къ ней любую параллельную до пересѣченія съ линіей TA_k. XY_k будетъ единицей масштаба скольженій.

21. Наибольшій вращающій моментъ и наибольшая мощность.

Изъ круговой діаграммы легко можно опредѣлить наибольшій вращающій моментъ и наибольшую мощность. Очевидно наибольшая мощность будетъ $Q'\Lambda$, (фиг. 76), а наибольшій моментъ $Q'G_d$.

Первая соотвѣтствуетъ току въ статорѣ OA_l и скольженію XY_l, второй—току OA_d и скольженію XY_d. Какъ видно, мощность съ

увеличеніемъ тока статора достигаетъ максимума раньше, чѣмъ вращающій моментъ. Объясняется это тѣмъ, что мощность представляетъ произведеніе вращающаго момента на угловую скорость, а при увеличеніи нагрузки послѣдняя убываетъ мед-



Фиг. 76.

леннѣе, чѣмъ возрастаетъ вращающій моментъ. Поэтому при токѣ OA_1 — мощность будетъ наибольшая, тогда какъ соотвѣтствующій вращ. моментъ $Q'G_1$ меньше максимальнаго $Q'G_d$.

Въ главѣ 8 мы уже видѣли, что величиной наибольшаго момента опредѣляется предѣлъ перегрузки двигателя. На фиг. 21 приведены кривыя, полученныя изъ круговой діаграммы, зависимостей характерныхъ для двигателя величинъ отъ мощности для двухсильнаго двигателя, а на фиг. 22 приведены кривыя зависимостей тѣхъ же величинъ отъ скольженія. Какъ видно, наибольшая мощность, равная 4,5 лош. силамъ, получается при скольженіи 0,28 и силѣ тока въ 32 ампера. При дальнѣйшемъ возрастаніи тока, вслѣдствіе увеличенія нагрузки, мощность падаетъ, и при $s = 0{,}45$ и 43 амперахъ вращающій моментъ достигаетъ максимума. Если увеличивать нагрузку дальше, то вращающій моментъ будетъ падать, и онъ станетъ недостаточнымъ для преодолѣнія нагрузки, число оборотовъ и мощность начнутъ падать, и двигатель остановится.

На фиг. 20, изображающей тѣ же кривыя, что и на фиг. 21, но въ увеличенномъ масштабѣ и лишь въ предѣлахъ нормальной нагрузки, нанесены точки, полученныя непосредственно изъ опыта торможеніемъ.

Онѣ даютъ возможность судить о практической пригодности круговой діаграммы. Какъ видно, совпаденіе ихъ съ діаграммой вполнѣ достаточное, кромѣ скольженія. Для большей точности опыта былъ примѣненъ трехфазный генераторъ съ синусоидальной формой кривой напряженія, который приводился въ движеніе двигателемъ постояннаго тока, питавшимся отъ аккумуляторной баттареи. Такимъ образомъ были созданы наилучшія условія опыта. Несовпаденіе діаграммныхъ величинъ скольженія съ опытными получалось и при испытаніи другихъ двигателей.

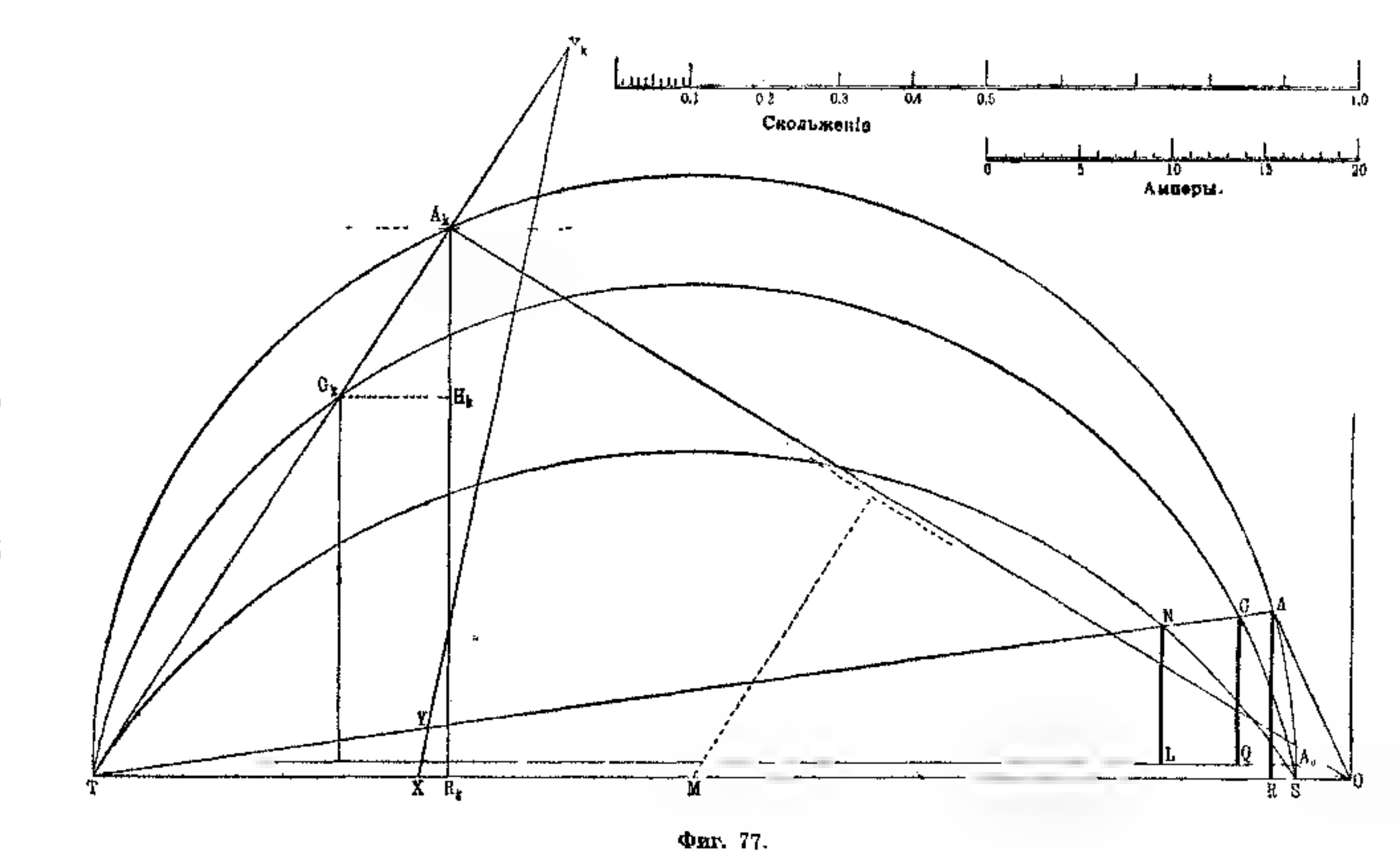
22. Примѣръ примѣненія круговой діаграммы.

При изслѣдованіи описаннаго выше двухсильнаго двигателя были измѣрены слѣдующія величины:

	Холостой ходъ.	Короткое замыканіе.
Фазное напряженіе при соединеніи звѣздой	66,5 в.	66,5 в.
Сила тока	3,1 амп.	56,8 амп.
Полная подводимая мощность . .	160 ват.	5890 ват.
Средняя мощность, потребляемая одной фазой	53,3 ват.	1963 ват
Коэффиціентъ мощности ($\cos\varphi_1$) . .	0,26	0,523
Сопротивленіе обмотки одной фазы статора 0,186 Ω	—	—
Число паръ полюсовъ 2	—	—
Число періодовъ 50	—	—
Отсюда получается полный ваттный токъ	0,8 амп.	29,6 амп.

Масштабъ тока данъ на фиг. 77. Въ этомъ масштабѣ проведены въ разстояніяхъ $SA_o = 0{,}8$ и $A_kR_k = 29{,}6$ параллели къ OT. Изъ O радіусами $OA_o = 3{,}1$ и $OA_k = 56{,}8$ сдѣланы засѣчки и получены точки холостого хода A_o и короткаго замыканія A_k. Центръ круга полученъ пересѣченіемъ перпендикуляра, возстановленнаго изъ середины A_oA_k съ основной линіей OT (пунктирная линія). При короткомъ замыканіи первичныя тепловыя потери на фазу будутъ: $0{,}186 \cdot 56{,}8^2 = 600$ ваттъ. Дѣленіемъ на фазное напряженіе 66,5 получается ваттная составляющая тока 9 амп. Послѣднюю наносимъ въ масштабѣ тока на A_kR_k (A_kH_k). Получаемъ точку G_k, принадлежащую кругу вращ. моментовъ, центръ котораго найдется на основаніи предыдущаго. Возставляя перпендикуляръ къ TA_k въ точкѣ T, найдемъ центръ круга мощности.

Для полученія AR, GQ' и NL' въ ваттахъ необходимо умножить масштабъ тока на $3 \cdot 66{,}5 = 199{,}5$, т.-е. единица масштаба тока равна 199,5 ваттамъ. Для перевода GQ' и NL' въ лошадиныя силы нужно полученныя числа еще раздѣлить на 736, т. е. единица масштаба тока = 0,272 лошад. силы. Для полученія величины вращающаго момента по величинѣ GQ', нужно ее раздѣлить на $\omega_1 = 2\pi c_1 = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 25 = 157$, а для полученія вращ. момента въ киллограммометрахъ—еще умножить на 75. Такимъ образомъ одно дѣленіе масштаба токовъ равно $\dfrac{0{,}272 \cdot 75}{157} = 0{,}1296$ килограммометра. Для точки A получимъ: потребляемый токъ $OA = 10$ амп., потребляемая мощность $AR = 1800$ ваттъ, вращающій моментъ $GQ' =$


0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
1,0
Скольженіе
0
5
10
15
20
Амперы.
V_k
A_k
C_k
H_k
Y
N
C
A
L
Q
A_0
T
X
R_k
M
R
S
O

Фиг. 77.

1,01 кгр.-метра и полезная мощность NL' — 2 лош. силы Скольженіе для этой точки $= X1$. Для опредѣленія его численной величины раздѣлимъ XY_k на 100 частей, какъ изображено на масштабѣ. Такъ какъ $X1 = 6{,}8$ такихъ частей, то скольженіе составляетъ 0,068 или 6,8%.

Пускъ въ ходъ двигателей и регулированіе числа оборотовъ.

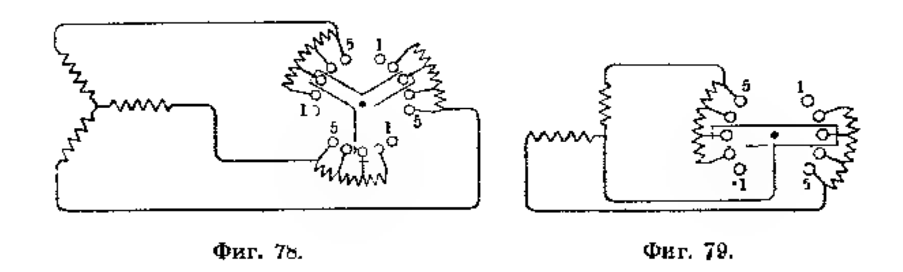
24. Пусковые реостаты.

Примѣненіе пусковыхъ реостатовъ для асинхронныхъ двигателей вызывается тремя причинами: 1) достиженіе наибольшаго возможнаго начальнаго момента; 2) уменьшеніе силы тока при пускѣ въ ходъ; 3) предохраненіе отъ перенапряженій при включеніи двигателя.

Увеличеніе начальнаго вращающаго момента, какъ указано въ главѣ 9, можетъ быть достигнуто увеличеніемъ сопротивленія вторичной цѣпи. Правильно выбравъ послѣднее, можно получить максимальный вращ. моментъ при троганіи съ мѣста, соотвѣтственно кривой C фиг. 14. Это сопротивленіе опредѣляется изъ ур. (27) для $s = 1$ и будетъ $r_2 = 2\pi c_1 L_2'$ (ср. гл. 9, фиг. 16 и гл. 21). Во избѣжаніе при этомъ пониженія коэф. пол. дѣйствія, сопротивленіе вторичной цѣпи увеличивается лишь на время пуска въ ходъ (фиг. 15). Для этого роторъ снабжается кольцами и щетками, при посредствѣ которыхъ въ цѣпь ротора можетъ включаться сопротивленіе. При достиженіи нормальнаго режима работы роторъ замыкается на короткое.

Одновременно съ увеличеніемъ вторичнаго сопротивленія уменьшается пусковой токъ, какъ видно изъ равенства (32). Во многихъ случаяхъ при пускѣ въ ходъ не требуется имѣть наибольшаго вращ. момента, а достаточно незначительнаго увеличенія его. Въ такихъ случаяхъ сопротивленіе пускового раостата берется большимъ, и онъ дѣлается регулируемымъ. На фиг. 78 показанъ такой реостатъ для трехфазнаго, а на фиг. 79—для двухфазнаго двигателя. Когда рукоятка стоитъ на контактѣ 1, цѣпь ротора разомкнута. Если поставить рукоятку на контактѣ 2, то будетъ включенъ весь реостатъ. При дальнѣйшемъ же ея передвиженіи реостатъ выключается частями, и по достиженіи контакта 5, обмотка ротора замыкается на короткое. Если необходимый начальный вращ. моментъ невеликъ, то двигатель начнетъ вращаться уже при положеніи ручки на первомъ контактѣ, т. е. при незначительной силѣ тока. Если необходимый моментъ больше, то двигатель начнетъ вращаться на второмъ контактѣ, но уже при большей силѣ тока. Если этого недостаточно, то

рукоятку передвигаютъ дальше, пока не получится сопротивленiя, соотвѣтствующаго необходимому вращающему моменту.



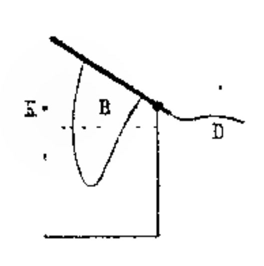
Фиг. 78. Фиг. 79.

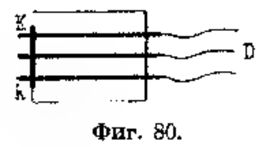
Если двигатель не идетъ и при всемъ выведенномъ реостатѣ, то онъ вообще не можетъ развить достаточнаго враш. момента, т. е. онъ для даннаго случая слабъ.

Реостаты, представленные на фиг. 78 и 79 изготовляются изъ проволоки для сопротивленiй.

Тепловыя потери въ немъ и въ обмоткѣ ротора $V = mr_2\mathfrak{J}_2^2$ находятся при какомъ-нибудь скольженiи s по уравн. (10), (11) или (12), смотря по тому, исходимъ ли мы изъ вращающаго момента передаваемой или отдаваемой мощности.

Постепенное уменьшенiе пускового сопротивленiя достигается жидкимъ пусковымъ реостатомъ, въ противоположность вышеописанному, гдѣ оно происходитъ скачками. На фиг. 80 представленъ схематически такой реостатъ въ формѣ, изготовляемой фирмой Вс. К. Эл. Въ желѣзномъ сосудѣ, наполненномъ обыкновенной водой или слабымъ растворомъ соды, расположены три желѣзныхъ пластины, изолированныя другъ отъ друга и отъ сосуда и могущiя вращаться около оси. Къ каждой пластинѣ подходитъ проводъ отъ щетки ротора. Если пластины вынуть изъ жидкости, то вторичная цѣпь двигателя разомкнута. По мѣрѣ ихъ погруженiя, сопротивленiе уменьшается. По достиженiи двигателемъ нормальнаго числа оборотовъ роторъ его замыкается на короткое посредствомъ контактовъ у пластинъ и у корпуса реостата (K).

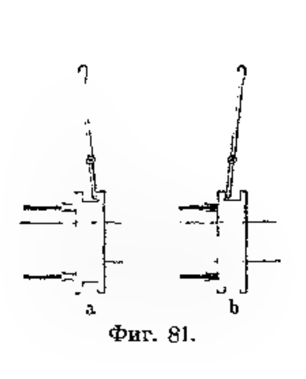




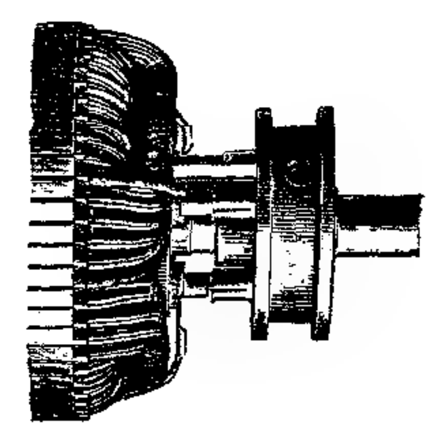
Фиг. 80.

Въ большихъ двигателяхъ, гдѣ сопротивленiе ротора очень мало и сопротивленiемъ контакта щетокъ и соединительныхъ проводовъ пренебречь нельзя, для короткаго замыканiя ротора дѣлаютъ особое приспособленiе на самомъ роторѣ: на валу ротора насаживаютъ подвижное кольцо изъ хорошо проводящаго металла, какъ показано на фиг. 81 и 82.

Въ положеніи *a* (фиг. 81) токъ ротора проходитъ черезъ щетки въ пусковой реостатъ, въ положеніи же *b* роторъ замкнутъ на короткое. При такомъ устройствѣ не слѣдуетъ забывать при остановкѣ двигателя переставлять кольцо въ поло-



Фиг. 81.

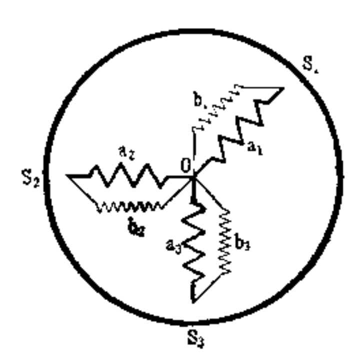

Фиг 82.

женіе *a*, такъ какъ иначе приелѣдующемъ пускѣ въ ходъ реостатъ окажется замкнутымъ на короткое и не будетъ дѣйствовать. На фиг. 62 представлена другая конструкція. Соединенные съ обмоткой контакты прилегаютъ къ внутренней поверхности передвижного кольца. Во избѣжаніе изнашиванія колецъ и потерь на треніе щетокъ о нихъ, послѣднія послѣ короткаго замыканія отводятся отъ колецъ. Замыканіе ротора на короткое и подниманіе щетокъ совершается обыкновенно посредствомъ одного общаго приспособленія, при чемъ замыканіе на короткое предшествуетъ поднятію щетокъ, и, наоборотъ, опусканіе щетокъ предшествуетъ размыканію ротора.

Пусковые реостаты, изображенные на фиг. 78—82 необходимы въ тѣхъ случаяхъ, когда токъ, потребляемый двигателемъ при пускѣ въ ходъ, не долженъ превосходить тока при нормальной нагрузкѣ. Если же такого ограниченія не имѣется и при пускѣ въ ходъ нужно получить максимальный вращ моментъ, то достаточно имѣть одно опредѣленное не секціонированное сопротивленіе. То же самое достигается и при помощи двигателей съ двойной обмоткой ротора (строятся Всеобщей Комп. Эл.). Подъ фазовой обмоткой помѣщается короткозамкнутая обмотка, сопротивленіе которой какъ разъ достаточно для пуска въ ходъ съ необходимымъ начальнымъ вращ. моментомъ. Находящаяся надъ ней фазовая обмотка присоединена къ короткозамыкателю, который приводится въ дѣйствіе или отъ руки, какъ на фиг. 82, или автоматически центробѣжнымъ регуляторомъ, какъ на фиг. 83

При пускѣ въ ходъ дѣйствуетъ только короткозамкнутая обмотка. По достиженіи же двигателемъ опредѣленнаго числа [1]) оборотовъ центробѣжная сила массы M на рычагѣ H преодолѣваетъ силу натяженія пружины F. Вслѣдствіе этого масса M передвигается къ краю шкива и вращаетъ кольцо съ укрѣпленными на немъ контактами C, замыкающими концы D фазовой обмотки. При выключеніи двигателя и уменьшеніи числа оборотовъ сила пружины F получаетъ перевѣсъ, вращаетъ кольцо съ контактами C въ обратную сторону и размыкаетъ фазовую обмотку.

Фиг 83.



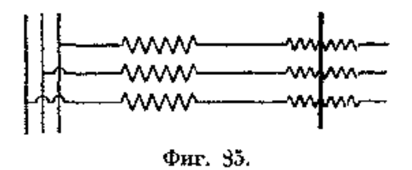
Фиг 84

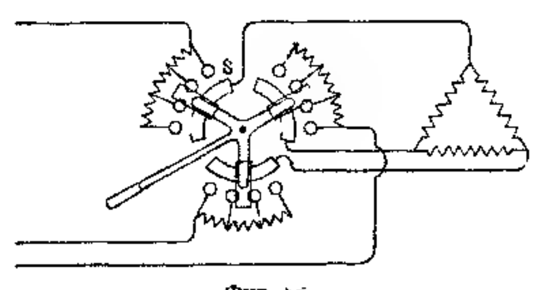
Ту же цѣль преслѣдуютъ и двигатели съ роторами со встрѣчнымъ включеніемъ (Сименсъ и Гальске) (фиг. 84). Каждая фаза обмотки представляетъ замкнутую цѣпь Oab. Обмотка b имѣетъ настолько большое сопротивленіе, что общее сопротивленіе $a+b$ даетъ необходимый вращающій моментъ, или обмотки a и b включены навстрѣчу, такъ что дѣйствуетъ только разность эл.-дв. силъ. По достиженіи опредѣленнаго числа оборотовъ обмотки присоединяются къ точкамъ S_1, S_2 и S_3 замыкателя или отъ руки по фиг. 82, или автоматически по фиг 83. Вслѣдствіи этого обмотки a и b включены параллельно, и сопротивленіе каждой фазы равно $\frac{ab}{a+b}$.

Двигатели съ роторами съ двойными обмотками того и другого типа дають при пускѣ въ ходъ два толчка тока первый въ моментъ включенія двигателя и второй при замыканіи ротора на короткое. Толчки эти были бы очень велики при большихъ двигателяхъ, а потому подобныя приспособленія употребляются лишь при двигателяхъ средней мощности. Ихъ выгода заключается въ томъ, что при примѣненіи центробѣжнаго регулятора они не требуютъ никакого обслуживанія

[1]) Немного менѣе нормальнаго *Прим. ред.*

Въ тѣхъ случаяхъ, когда должно быть выполнено второе требованіе, именно, уменьшеніе потребленія тока, слѣдовательно, гдѣ пускъ происходитъ безъ нагрузки, могутъ примѣняться и большіе двигатели съ короткозамкнутымъ роторомъ. Для уменьшенія толчковъ тока при включеніи употребляются реостаты въ цѣпи статора. Ихъ роль уменьшить первичную эл.-дв. силу на величину паденія напряженія въ нихъ. По ур. (32) начальный вращ. моментъ пропорціоналенъ квадрату первичнаго тока, а слѣдовательно, если сопротивленіе подобрано такъ, что при включеніи его получается половина того тока, который былъ бы безъ реостата, то начальный вращ. моментъ получается въ четыре раза меньшій. При двигателѣ съ соединеніемъ обмотки статора звѣздой и доступной нейтральной точкой можно примѣнить реостаты фиг. 78 80. Въ этомъ случаѣ они включаются между обмоткой и нейтральной точкой (фиг. 85). Нейтральная точка находится въ реостатѣ. Въ двигателяхъ съ недоступной нейтральной точкой или съ соединеніемъ фазъ треугольникомъ реостатъ включается передъ двигателемъ, и фазы въ реостатѣ должны оставаться изолированными другъ отъ друга и послѣ замыканія ротора на короткое (фиг. 86). Токъ каждой фазы проходитъ отъ соотвѣтствующаго контакта черезъ контактную щетку къ контактной полосѣ S къ статору двигателя. Въ такихъ случаяхъ вмѣсто безъиндукціонныхъ сопротивленій могутъ быть примѣнены въ качествѣ реостатовъ для статора и


Фиг. 85.



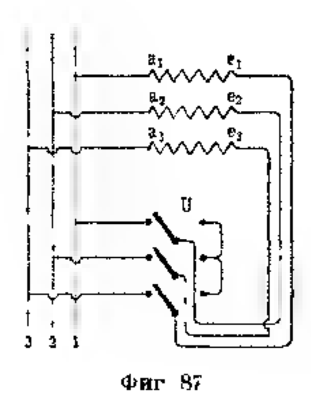
Фиг. 86.

реактивныя катушки, такъ какъ здѣсь необходимо лишь уменьшить приложенное къ статору напряженіе. Ошибочно было бы употреблять индукціонныя сопротивленія для включенія въ цѣпь ротора, такъ какъ увеличивая самоиндукцію вторичной цѣпи двигателя мы уменьшаемъ его наибольшій вращающій моментъ и начальный вращ. моментъ (см. форм. 30 и 33).

Кромѣ безъиндукціонныхъ и индукціонныхъ сопротивленій для цѣлей пониженія напряженія приложеннаго къ статору

могутъ быть примѣнены и трансформаторы. Трансформаторъ можетъ быть и секціонированный. По достиженіи опредѣленнаго числа оборотовъ двигатель присоединяется непосредственно къ сѣти, а трансформаторъ выключается.

Уменьшеніе пускового тока пониженіемъ напряженія можетъ быть произведено еще слѣдующимъ образомъ. Двигатель, который при нормальной работѣ имѣетъ соединеніе обмотокъ статора треугольникомъ, пускаютъ въ ходъ при соединеніи звѣздой и, по достиженіи соотвѣтственнаго числа оборотовъ, переключаютъ на соединеніе треугольникомъ. Если, напр., двигатель включается на 190 в. треугольникомъ, то фазное напряженіе равно 190 в. Если соединить его звѣздой, то при включеніи на сѣть съ напряженіемъ въ 190 вольтъ фазное напряженіе равно только 110 вольтамъ. Сила тока такимъ образомъ уменьшится въ отношеніи $\frac{190}{110}$, а начальный вращающій моментъ уменьшится въ квадратъ этого отношенія. Такое пересоединеніе производится трехполюснымъ переключателемъ U (фиг. 87). При пускѣ въ ходъ онъ включается направо и производитъ соединеніе статора звѣздой. Когда двигатель достигъ нормальнаго числа оборотовъ переключатель врубается налѣво.



Фиг 87

Обратно, пускъ въ ходъ при соединеніи треугольникомъ примѣняется тогда, если требуется получить большій начальный вращ. моментъ чѣмъ нормальный, а величина пускового тока не имѣетъ значенія. Въ данномъ случаѣ двигатель, работающій нормально при соединеніи звѣздой, для пуска въ ходъ включается треугольникомъ. Теперь фазное напряженіе въ 1,73 раза больше, токъ растетъ въ этомъ же отношеніи, а вращающій моментъ — въ квадратъ отношенія.

Очевидно, что повышеніе напряженія въ цѣляхъ увеличенія начальнаго вращ. момента можетъ быть достигнуто и трансформаторомъ. По достиженіи требуемаго числа оборотовъ двигатель присоединяется къ сѣти, а трансформаторъ выключается.

Каждый двигатель требуетъ опредѣленнаго времени для достиженія нормальнаго числа оборотовъ и, при прочихъ равныхъ условіяхъ, тѣмъ большаго времени, чѣмъ больше моментъ инерціи ротора. Съ другой стороны необходимъ тѣмъ большій вращ моментъ, чѣмъ большее ускореніе требуется дать ротору, т.-е. чѣмъ быстрѣе онъ долженъ достигнуть нормальной скорости. Поэтому въ цѣляхъ наименьшаго потребленія тока недостаточно только включить въ роторъ реостатъ, но

необходимо включать его медленно и постепенно, чтобы дать время установиться соотвѣтствующимъ данному сопротивленію оборотамъ. Въ такихъ случаяхъ полезно имѣть въ первичной цѣпи амперметръ и слѣдить за тѣмъ, чтобы сила тока не превосходила опредѣленнаго предѣла. Ручка реостата передвигается дальше, послѣ того какъ сила тока начнетъ падать. Опытный монтеръ производитъ правильный пускъ въ ходъ и безъ амперметра. Чтобы не зависѣть отъ надежности персонала, снабжаютъ реостатъ червячной передачей, такъ что на передвиженіе его рычага съ одного контакта на другой требуется сдѣлать ручкой передачи нѣсколько оборотовъ.

Иногда, когда требуется обезпечить возможно меньшіе толчки тока при пускѣ въ ходъ примѣняютъ два реостата: въ роторѣ и въ статорѣ, соединяя ихъ въ одинъ аппаратъ, такъ что при вращеніи ручки сначала выключается постепенно сопротивленіе въ статорѣ, а затѣмъ—въ роторѣ.

Лучшимъ способомъ пуска въ ходъ двигателя съ большимъ начальнымъ моментомъ можно считать пускъ въ ходъ при пониженной частотѣ питающаго двигатель тока. Какъ мы видѣли въ главѣ 9 (ур. 33—35) начальный моментъ обратно пропорціоналенъ числу періодовъ подводимаго тока. Къ сожалѣнію, уменьшеніе числа періодовъ возможно только въ рѣдкихъ случаяхъ, именно, когда генераторъ работаетъ только на одинъ или нѣсколько двигателей, пускаемыхъ одновременно въ ходъ, или, если существуетъ запасная машина, на которую двигатели могутъ переключаться при пускѣ. Въ этомъ случаѣ роторъ замыкается на короткое (если онъ вообще не коротко замкнутый) и генератору дается нормальное возбужденіе. Какъ только генераторъ начнетъ вращаться онъ посылаетъ въ двигатель токъ короткаго замыканія, приблизительно равный нормальному, такъ какъ ваттное сопротивленіе неподвижнаго двигателя съ коротко-замкнутымъ роторомъ очень мало сравнительно съ безваттнымъ.

Послѣднее измѣняется пропорціонально числу періодовъ, какъ и эл.-дв. сила, такъ что токъ короткаго замыканія, при одинаковомъ возбужденіи генератора, мало зависитъ отъ періодовъ съ увеличеніемъ числа оборотовъ генератора, т. е.. числа періодовъ, сила тока и вращающій моментъ падаетъ, а эл.-дв. сила возрастаетъ. Двигатель все это время находится вблизи синхронизма.

Двигатели, которые должны при пускѣ въ ходъ преодолѣвать большой моментъ инерціи, и мощность которыхъ лишь не многимъ меньше мощности генератора, невозможно пускать въ ходъ при полномъ возбужденіи послѣдняго. Въ такомъ случаѣ пускаютъ генераторъ тихимъ ходомъ (1—2 оборота въ сек.), а затѣмъ возбуждаютъ его. Если имѣется особый генераторъ для пуска въ ходъ, то по достиженіи двигателемъ нормальнаго числа оборотовъ его переключаютъ на рабочій генераторъ.

При большихъ двигателяхъ высокаго напряженія въ цѣпь статора иногда включаются реостаты съ цѣлью защиты отъ возможныхъ перенапряженій при включеніи и выключеніи. Явленія, сопровождающія размыканіе цѣпи перемѣннаго тока, не вполнѣ аналогичны явленіямъ при размыканіи цѣпи постояннаго тока. При размыканіи появляется вольтова дуга, которая по мѣрѣ удаленія контактовъ другъ отъ друга быстро ослабѣваетъ и прекращается при переходѣ тока черезъ нуль, такъ какъ при слѣдующемъ возрастаніи онъ не въ состояніи пробить слой воздуха. При размыканіи же тока во время его прохожденія черезъ нуль перенапряженія не можетъ быть. Послѣднее получается, если размыканіе совершается въ тотъ моментъ, когда токъ имѣетъ максимумъ или близокъ къ нему. Но и въ такомъ случаѣ перенапряженіе возможно лишь тогда, когда токъ настолько слабъ, что не образуетъ вольтовой дуги. Кромѣ того перенапряженіе можетъ явиться слѣдствіемъ зарядного тока, такъ какъ обмотки высокаго напряженія, вслѣдствіе тщательной изоляціи ихъ отдѣльныхъ фазъ другъ отъ друга и отъ желѣзнаго остова, обладаютъ не малой емкостью. Появленіе подобныхъ перенапряженій можетъ быть устранено, если включеніе или выключеніе производить не мгновенно, а постепенно, при помощи безъиндукціоннаго (жидкаго реостата). Для этой цѣли можно также примѣнять и регулируемыя реактивныя катушки, если нѣтъ опасности появленія резонанса между увеличенной самоиндукціей двигателя и емкостью кабелей линіи. Во всѣхъ подобныхъ случаяхъ желательно примѣнять предохранители напряженій.

Перенапряженія можно избѣжать и включеніемъ и выключеніемъ обмотки статора при коротко-замкнутомъ роторѣ. Этимъ устраняется мгновенное измѣненіе магнитнаго состоянія, такъ какъ токъ въ роторѣ производитъ обратное току статора намагничивающее дѣйствіе. Кромѣ того, вслѣдствіе взаимной индукціи между роторомъ и статоромъ получается уменьшеніе самоиндукціи и увеличеніе ваттнаго сопротивленія двигателя съ замкнутымъ роторомъ. Для того, чтобы при такомъ включеніи двигатель не потреблялъ полнаго тока короткаго замыканія. замыкаютъ роторъ при включеніи не на короткое, а черезъ нѣкоторое сопротивленіе. Обычно въ качествѣ такого сопротивленія употребляется пусковой реостатъ, на которомъ устанавливается упорный штифтъ, такъ что размыкать совершенно ротора нельзя, а можно лишь ввести полное сопротивленіе реостата. При этомъ, однако, при выключеніи для остановки двигателя требуется выключать цѣпь статора.

Такой способъ включенія примѣнимъ, очевидно, и для трансформаторовъ. Включивъ во вторичную цѣпь трансформатора до включенія его въ сѣть, напримѣръ, нѣсколько лампочекъ накаливанія, мы можемъ по ихъ каленію въ моментъ включенія трансформатора въ сѣть наблюдать повышеніе напряженія.

24. Регулированіе числа оборотовъ.

Главный недостатокъ асинхроннаго двигателя сравнительно съ шунтовымъ двигателемъ постояннаго тока состоитъ въ томъ, что для перваго не существуетъ простого способа регулированія числа оборотовъ въ широкихъ предѣлахъ. Такъ какъ асинхронные двигатели стремятся вращаться синхронно съ полемъ и отстаютъ отъ него лишь на величину скольженія, то измѣненіе числа оборотовъ возможно только или измѣненіемъ числа періодовъ подводимаго тока, т. е. числа оборотовъ поля, или измѣненіемъ скольженія.

Первый способъ возможенъ при присоединеніи двигателя или двигателей къ особому генератору, число оборотовъ котораго можно измѣнять. Регулированіе будетъ происходить одновременно для всѣхъ двигателей. Увеличить скольженіе, какъ видно по форм. (9), можно только увеличеніемъ вторичныхъ потерь, что достигается увеличеніемъ сопротивленія цѣпи ротора. Но съ этимъ связано и пониженіе коэфф. полезнаго дѣйствія. При этомъ размѣры регулировочнаго реостата должны быть достаточны для отвода всей теплоты, въ немъ развиваемой. Обычные пусковые реостаты этому условію не удовлетворяютъ. Включеніе безваттнаго сопротивленія въ роторъ не достигаетъ цѣли, такъ какъ, по уравн. (9), увеличеніе скольженія достигается лишь увеличеніемъ потерь во вторичной цѣпи. Увеличеніе самоиндукціи влечетъ за собой лишь уменьшеніе вращающаго момента.

Неразрывно связанныя съ увеличеніемъ скольженія потери могутъ быть устранены, если токъ ротора отвести не въ реостатъ, а въ другой двигатель, соединенный съ первымъ и работающій съ нимъ на ту же нагрузку. Получается такъ называемое каскадное включеніе двигателей, примѣняемое въ нѣкоторыхъ случаяхъ (электрическія жел. дороги, прокатные станы и т. п.).

Такимъ образомъ возможно уменьшить число оборотовъ двухъ каскадомъ соединенныхъ двигателей вдвое сравнительно съ тѣмъ, которое они имѣли бы, будучи приключены непосредственно къ сѣти. При одинаковой мощности каскадная система развиваетъ двойной вращ. моментъ сравнительно съ вращающимъ моментомъ каждаго двигателя въ отдѣльности, такъ какъ число оборотовъ ихъ при этомъ вдвое меньше.

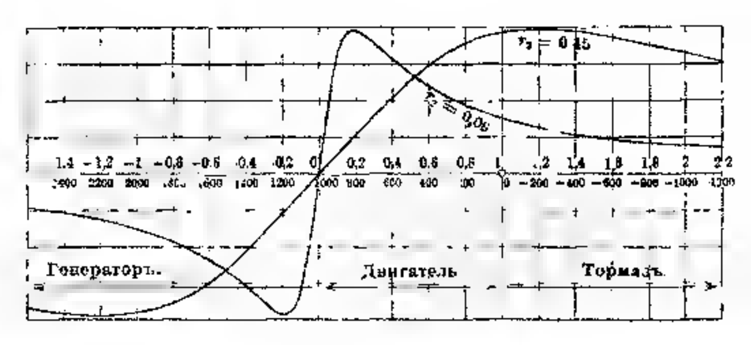
Измѣненіе числа оборотовъ вдвое достигается также переключеніемъ обмотки статора на половинное число полюсовъ. По уравненію 1 число оборотовъ поля, къ которому стремится роторъ, будетъ $n_1 = \frac{c_1}{p}$, т. е. синхронное число оборотовъ при постоянномъ числѣ періодовъ обратно пропорціонально числу паръ полюсовъ. Проще всего переключеніе на

половинное число полюсовъ производится у статоровъ съ кольцевой обмоткой. Но въ этомъ случаѣ коэффиціентъ мощности и вращающій моментъ получаются настолько плохими, что такое устройство на практикѣ не получило примѣненія. Только позже Behn-Eschenburg'у удалось въ двигателяхъ завода Эрликона получить практически пригодное переключеніе барабанной обмотки и не только на половинное, но и на промежуточное число оборотовъ.

Асинхронная машина въ необычныхъ условіяхъ работы.

25. Асинхронная машина въ качествѣ генератора

Въ главѣ 8 фиг. 14 представлена зависимость вращающаго момента асинхроннаго двигателя отъ скольженія (соотвѣтственно ур. 26) только для положительныхъ величинъ скольженія. Если по тому же уравненію вычислимъ вращающіе моменты и для отрицательныхъ скольженій s, то получимъ отрицательную вѣтвь кривой изображенную на фиг. 88 влѣво отъ оси ординатъ. Но если вращающій моментъ M отрицателенъ, то отрицательной должна быть и электрическая мощность W_1, такъ какъ она, по уравн. (6), равна $\omega_1 M$. Далѣе по уравн. (38), слѣдуетъ, что при отрицательномъ скольженіи и механическая мощность, передаваемая



Фиг. 88.

на валъ, также отрицательна, такъ какъ вращающій моментъ M отрицателенъ, а разность $1-s$ положительна. Такимъ образомъ теперь всѣ соотношенія противоположны тѣмъ, которыя были при положительной величинѣ скольженія, другими словами, машина не доставляетъ больше механической мощности, а ей должна быть таковая сообщена для вращенія ротора съ отрицательнымъ скольженіемъ. Наоборотъ машина доставляетъ

электрическую мощность, т. е. она посылаетъ токъ въ цѣпь. Изъ опредѣленія скольженія

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$$

слѣдуетъ, что оно отрицательно, если $\omega_2 > \omega_1$, т.-е. если вращать роторъ внѣшней силой быстрѣе магнитнаго поля. Такимъ образомъ асинхронная машина при скорости выше синхронной работаетъ генераторомъ. Ея вращающій моментъ теперь отрицательный, измѣняется по абсолютной величинѣ своей такъ же, какъ при работѣ двигателемъ. Частота тока, посылаемаго въ сѣть такимъ генераторомъ та же, что и частота въ сѣти. Если бы этого не было, то токъ генератора и токъ сѣти интерферировали бы, т.-е. токъ шелъ бы попеременно изъ машины въ цѣпь и обратно. Но токъ изъ сѣти въ машину не можетъ итти, такъ какъ вращающій моментъ отрицателенъ, а слѣдовательно частота тока генератора должна быть одинакова съ частотой сѣти, независимо отъ числа оборотовъ ротора. Такимъ образомъ генераторъ находится въ полной зависимости отъ сѣти. Если въ сѣти токъ прекратится, то и машина перестанетъ доставлять токъ. Дѣйствительно, если исчезаетъ вращающееся магнитное поле, т.-е. $n_1 = O$, то скольженіе $s = \infty$. Но при безконечно большомъ скольженіи, вращающій моментъ, по уравн. (26), равенъ нулю.

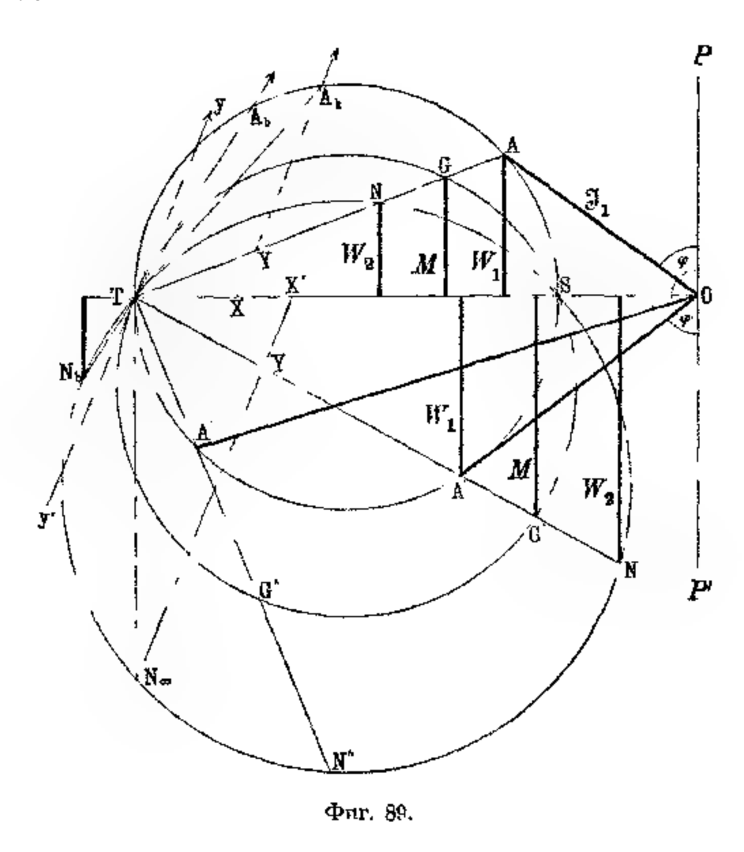
Физически процессъ отдачи тока объясняется такъ же, какъ при шунтовомъ двигателѣ, который мы начали вращать со скоростью большей той, которая у него была при работѣ двигателемъ. Вслѣдствіе вращенія ротора въ статорѣ развивается обратная электродвижущая сила, направленная противоположно напряженію сѣти. Пока число оборотовъ ротора меньше, чѣмъ вращающагося поля, эл.-дв. сила эта меньше напряженія сѣти. При вращеніи ротора съ большей скоростью обратная электродвижущая сила получаетъ преобладаніе, и токъ идетъ въ сѣть.

Такимъ образомъ въ асинхронномъ генераторѣ только сила тока и мощность, но не число періодовъ тока зависятъ отъ числа оборотовъ и для возможности отдачи имъ тока ему необходима сѣть, опредѣляющая число періодовъ. Подобный генераторъ въ противоположность синхронному можетъ быть включенъ въ сѣть безъ необходимости уравниванія фазъ напряженій и безъ синхронизированія. Если асинхронная машина приключается къ сѣти, вращаясь со скоростью ниже синхронной, то она потребляетъ токъ и работаетъ двигателемъ; будучи же приключена къ сѣти при скорости выше синхронной, она сама посылаетъ токъ въ сѣть; при синхронизмѣ же она является индифферентной, т.-е. не работаетъ ни двигателемъ, ни генераторомъ, и беретъ изъ сѣти только токъ для намагничиванія [1]).

---

[1]) Это не совсѣмъ правильно: при синхронизмѣ асинхронная машина беретъ изъ сѣти энергію, необходимую для покрытія потерь въ желѣзѣ и потерь въ обмоткѣ статора. *Прим. ред.*

Соотношеніе между всѣми величинами, кромѣ скольженія, для генератора получается изъ той же круговой діаграммы, если всѣ три круга въ ней начертить полностью, какъ сдѣлано на фиг. 89. При холостомъ ходѣ ($s=0$) точка A (конецъ вектора $\mathfrak{J}_1$) совпадаетъ съ S, при работѣ двигателемъ она перемѣщается по верхней части окружности отъ S до A_k, а при работѣ генераторомъ—по нижней части отъ S черезъ A' до T.



Фиг. 89.

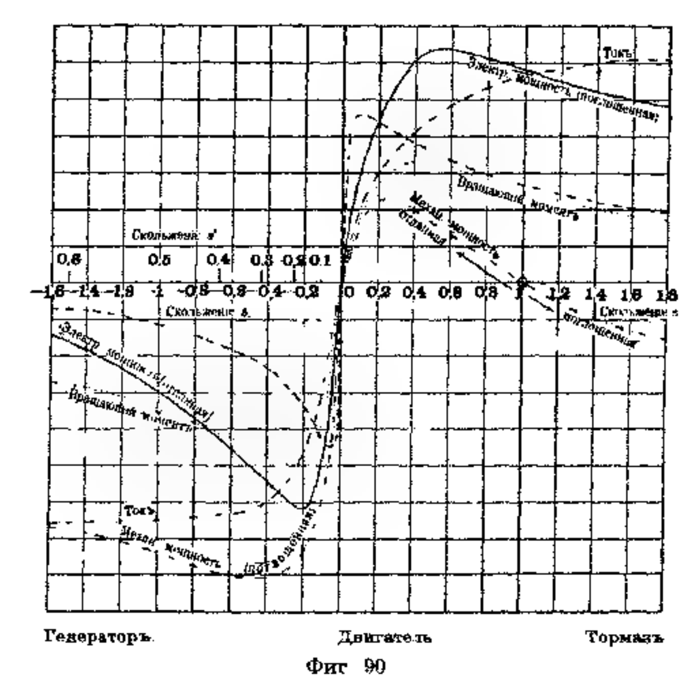
Токъ $\mathfrak{J}_1'$, посылаемый въ сѣть, изобразится векторомъ OA', уголъ сдвига его φ относительно приложеннаго къ машинѣ напряженія P больше 90^0, откуда и слѣдуетъ, что токъ идетъ въ сѣть. Его электрическая мощность

$$W_1 = P \cdot \mathfrak{J} \cos(180 - \varphi') = - P \cdot \mathfrak{J} \cos\varphi',$$

гдѣ φ' сдвигъ фазъ между $\mathfrak{J}_1'$ и P'. Такъ какъ P' противоположно приложенному къ двигателю напряженію P, то P' пред-

ставляетъ обратную электродвижущую силу машины. Перпендикуляръ, опущенный изъ A' на OT представляетъ какъ и въ двигателѣ ваттную составляющую тока, или въ соотвѣтствующемъ масштабѣ доставляемую электрическую мощность. Перпендикуляръ M изъ точки G' круга моментовъ даетъ вращающій моментъ. Перпендикуляръ M_2 изъ точки N' круга мощности даетъ механическую мощность (пренебрегая потерями въ желѣзѣ), необходимую для вращенія ротора со скоростью выше синхронной, т.-е. поглощаемую машиной механическую мощность W'_2. Изъ діаграммы видно, что вращающій моментъ имѣетъ максимумъ, какъ намъ извѣстно уже изъ фиг. 88.

Коэффиціентъ мощности ($\cos\varphi'$), электрическая и механическая мощности имѣютъ также максимумы. На фиг. 90 показано



Фиг 90

измѣненіе этихъ величинъ въ зависимости отъ скольженія. Но скольженіе здѣсь находится инымъ способомъ, чѣмъ для двигателя, такъ какъ соображенія главы 20 не примѣнимы для нижней части діаграммы, гдѣ кругъ электрической мощности лежитъ внутри круга моментовъ, а послѣдній внутри круга механической мощности. Но мы получимъ подобныя же соотношенія, введя вмѣсто скольженія

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_2}, \quad \ldots \ldots \ldots (83)$$

которое отрицательно для выше-синхроннаго режима, другое скольженіе, которое положительно, а именно

$$s' = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2} = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (84)$$

Здѣсь въ знаменатель входитъ не скорость поля ω_1, а скорость ротора ω_2. Такъ какъ при такомъ режимѣ работы машины $\omega_2 > \omega_1$, то s' положительно. Введя s' въ выраженіе для потерь въ роторѣ (ур. 8), получимъ:

$$V - W_1 - W_2 = (\omega_1 - \omega_2)\; M = -s'\omega_2 M \quad . \; . \; (85)$$

$$V = s' W_2 \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (86)$$

Потери здѣсь отрицательны, такъ какъ механическая мощность W_2 сообщается машинѣ, а не получается отъ нея. Изъ равенства (85)

$$M = -\frac{V}{s' \cdot \omega_2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (87)$$

Введя s' въ выраженіе для W_1 (ур. 6), получимъ

$$W_1 = \omega_1 M = \omega_2 \; (1 - s') \; M \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; (88)$$

Для механической мощности сохранимъ тоже выраженіе (глава 7), а именно

$$W_2 = \omega_2 M.$$

Такъ какъ при выше-синхронномъ режимѣ $s' < 1$ и положительно, то два послѣднія равенства показываютъ, что подводимая механическая мощность W_2 больше отдаваемой электрической W_1. Равенства (85) и (88) аналогичны равенствамъ (9) и (38) для двигателя.

Чѣмъ быстрѣе вращается роторъ, т.-е. чѣмъ больше ω_2, тѣмъ ближе s' къ единицѣ; при

$$\omega_2 = \infty \qquad s' = 1.$$

Тогда, по ур. (86),

$$V = -W_2 \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (89)$$

и, по ур. (88),

$$W_1 = O,$$

т.-е. вся сообщаемая машинѣ механическая мощность превра-

щается въ роторѣ въ теплоту, а отдаваемая электрическая мощность равна нулю. Эти крайніе случаи показываютъ, что къ s' могутъ быть примѣнены тѣ же разсужденія, какъ къ s въ гл. 20, т.-е. что скольженіе s' изобразится прямой $X'N_x$, параллельной касательной Ty' къ кругу моментовъ и проходящей черезъ точку N_x, для которой электрическая мощность равна нулю. Что электрическая мощность въ точкѣ N_x равна нулю слѣдуетъ изъ того, что перпендикуляръ изъ этой точки касается круга мощности въ точкѣ T, въ то время какъ подводимая мощность, вся превращаемая въ теплоту, по уравн. (89) равна $N_\infty T$. Такъ какъ, по предыдущему, электрическая мощность равна нулю при $s' = 1$, то отрѣзокъ $X'N_x$ представляетъ единицу для скольженія. Раздѣлимъ его на 100 частей и если отрѣзокъ $X'Y'$ равенъ, напр., 12 частямъ, то скольженіе s' для точки N' равно 0,12. Спрашивается, какая связь существуетъ между s и s'. Изъ равенствъ (83) и (84) слѣдуетъ, что для $\omega_2 = \infty$, $s = -\infty$ и $s' = 1$. Такимъ образомъ точкѣ N_∞ соотвѣтствуетъ безконечно большая скорость ротора и скольженіе $s = \infty$. Вообще же получаемъ слѣдующую связь между s и s'.

По уравн. (84)

$$\omega_2 - \omega_1 = \omega_2 \; s'$$

Подставивъ въ уравн. (83), имѣемъ

$$s = -\frac{\omega_2}{\omega_1} s'$$

Изъ уравн. (83)

$$s = 1 - \frac{\omega_2}{\omega_1},$$

слѣдовательно

$$s = (s - 1) s'$$

Отсюда

$$s' = \frac{s}{s - 1} \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (90)$$

или

$$s = \frac{s'}{s' - 1} \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (91)$$

Для предыдущаго примѣра, гдѣ $s' = 0,12$,

$$s = \frac{0,12}{-0,88} = -0,136.$$

Если желаютъ опредѣлить связь величинъ W_1, W_2, M со скольженіемъ s, то измѣряютъ въ круговой діаграммѣ s' по

прямой $X'N_\infty$ и по послѣднему уравненію вычисляютъ s. Такимъ образомъ получены кривыя фиг. 90. Правыя части кривыхъ до скольженія $s=1$ идентичны кривымъ фиг. 22, полученнымъ изъ діаграммы фиг. 77. Части, лежащія влѣво отъ нуля, представляютъ зависимость отъ отрицательнаго скольженія, т.-е. для выше-синхроннаго режима работы машины. Здѣсь, кромѣ того, нанесены величины s' отъ 0 до 0,6. Въ этихъ кривыхъ приняты во вниманіе и потери на треніе и потери въ желѣзѣ, такъ какъ M и W_2 измѣрялись не отъ діаметра OT, а отъ параллели $A_0 L'$ (фиг. 77). При увеличеніи скорости ротора потери, очевидно, будутъ больше, чѣмъ при синхронной скорости, такъ какъ онѣ растутъ быстрѣе скорости.

Разсмотримъ еще характерный случай, когда роторъ вращается съ двойною скоростью поля $\omega_2=2\omega_1$. Для этого случая $s=-1$ и $s'=0,5$. Соотвѣтствующую этой работѣ точку найдемъ на діаграммѣ фиг. 89, раздѣливъ пополамъ линію скольженія $X'N_\infty$ и проведя черезъ точку дѣленія линію TN''. Послѣдняя пересѣчетъ кругъ электрической мощности въ точкѣ A''. Векторъ $A''O=\mathfrak{J}_1''$ есть сила тока, посылаемая при этой скорости въ сѣть.

Какъ было сказано раньше, для включенія асинхроннаго генератора въ сѣть совпаденіе фазъ, какъ у синхроннаго генератора, не нужно, и онъ не можетъ выпасть изъ синхронизма. Зато онъ имѣетъ весьма важный недостатокъ. Изъ діаграммы и кривыхъ фиг. 90 слѣдуетъ, что его сила тока зависитъ отъ коэффиціента мощности, т.-е. сила тока, посылаемая генераторомъ въ сѣть при опредѣленной скорости ротора, связана съ опредѣленнымъ сдвигомъ фазъ. Послѣдній зависитъ не отъ пріемниковъ въ сѣти, какъ при синхронномъ генераторѣ, а отъ самой машины. Въ подобномъ генераторѣ нельзя регулировать напряженія, такъ какъ у него нѣтъ самостоятельнаго возбужденія. Вслѣдствіе этого область примѣненія подобныхъ генераторовъ ограничена. Нельзя устроить самостоятельную станцію съ одними асинхронными генераторами, такъ какъ для нихъ необходима сѣть съ токомъ опредѣленнаго числа періодовъ.

Асинхронный двигатель на подъемникѣ можетъ работать генераторомъ при опусканіи груза, если скорость превзойдетъ синхронную. Подобное имѣетъ мѣсто при спускѣ съ горы вагона электрической желѣзной дороги съ асинхроннымъ двигателемъ. Благодаря отдачѣ тока въ сѣть, движеніе при этомъ затормаживается.

26. Асинхронная машина въ качествѣ тормаза.

При измѣненіи нагрузки асинхроннаго двигателя отъ холостого хода до остановки, точка A передвигается по верхней части окружности (фиг. 89) отъ точки S до точки корот-

каго замыканія A_k, гдѣ $s=1$. Тепловыя потери $V=sW_1$ (ур 10) при $s=1$ равны всей подводимой электрической мощности, а механическая мощность равна нулю. Если скольженіе больше единицы, что по опредѣленію $s=\frac{\omega_1-\omega_2}{\omega_1}$ будетъ при отрицательномъ ω_2, т.-е. при вращеніи ротора противъ магнитнаго поля, то тепловыя потери станутъ больше подводимой электрической мощности W_1. Послѣднее возможно лишь тогда, когда машинѣ сообщается не только электрическая, но и механическая мощность, и обѣ обращаются въ роторѣ въ теплоту. Дѣйствительно изъ ур. (7)

$$W_2=\omega_2 M$$

слѣдуетъ, что при отрицательной угловой скорости ротора ω_2 механическая мощность отрицательна, такъ какъ M по уравн. (26), при положительномъ s, всегда положительно. Это же слѣдуетъ изъ кривыхъ фиг. 88. Итакъ асинхронная машина при скольженіи большемъ единицы дѣйствуетъ какъ поглощающій работу **т о р м а з ъ**. Что скольженіе по лѣвую сторону точки A_k больше единицы выражается тѣмъ, что линія скольженія XA_k должна быть продолжена за точку A_k для пересѣченія съ векторомъ TA_b. Подводимая электрическая мощность выражается для этой точки перпендикуляромъ изъ A_b на OT. Но векторъ TA_b, продолженный въ обратную сторону, пересѣкаетъ и кругъ механической мощности въ точкѣ N_b. Перпендикуляръ N_b, опущенный изъ этой точки на продолженіе діаметра, отрицателенъ и представляетъ, слѣдовательно, механическую мощность, которую необходимо затратить для вращенія ротора въ направленіи обратномъ полю, и которая также превращается въ теплоту.

На фиг. 90 вправо отъ скольженія, равнаго единицѣ, показано измѣненіе вращающаго момента, электрической и механической мощностей. Какъ видно, послѣдняя лежитъ ниже оси абсциссъ, такъ какъ въ противоположность работѣ двигателемъ, она не отдается, а затрачивается. Изъ діаграммы (фиг. 89) видно, что машина работаетъ тормазомъ влѣво отъ точки A_k до тѣхъ поръ пока векторъ TA_b не совпадаетъ съ касательной Ty къ кругу моментовъ. Въ этомъ случаѣ онъ пересѣкаетъ линію скольженія въ безконечности, т.-е. $s=-\infty$. Изъ ур. (26) слѣдуетъ, что для $s=\infty$ вращающій моментъ $M=O$.

Случай вращенія ротора противъ вращенія поля встрѣчается на практикѣ, напр., тогда, когда крановый двигатель не можетъ далѣе поднимать груза, и послѣдній начинаетъ опускаться, или поднимающійся въ гору вагонъ съ асинхроннымъ двигателемъ опускается обратно.

Сопоставивъ все вышесказанное, мы должны различать три режима работы асинхронной машины въ предѣлахъ отъ $s=+\infty$ до $s=-\infty$. На діаграммѣ эти три режима ограни-

чены точками S, A_k и T. На фиг. 90 они ограничены жирноначерченными ординатами.

Эти режимы суть:

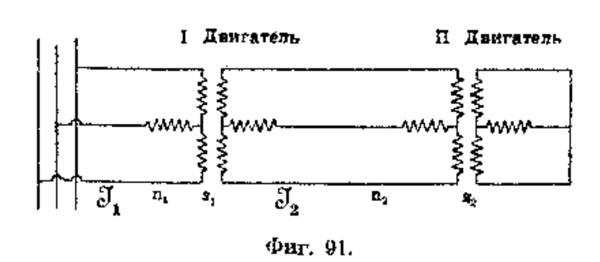
I. При измѣненіи скольженія отъ нуля до единицы, т.-е. при измѣненіи числа оборотовъ ротора отъ синхронизма до нуля, асинхронная машина работаетъ двигателемъ. Она потребляетъ электрическую энергію и доставляетъ механическую.

II. При измѣненіи скольженія отъ $+1$ до $+\infty$, т.-е. при вращеніи ротора въ направленіи обратномъ полю, она дѣйствуетъ какъ тормазъ. Она потребляетъ электрическую и механическую энергію, превращая ихъ въ тепловую.

III. При измѣненіи скольженія s отъ 0 до $-\infty$ (или s' отъ 0 до 1), т.-е. при измѣненіи числа оборотовъ отъ синхроннаго выше до $+\infty$, она работаетъ генераторомъ, потребляя механическую энергію и отдавая электрическую.

27. Каскадное включеніе асинхронныхъ двигателей.

Въ электрическихъ вагонахъ съ двумя асинхронными двигателями очень часто примѣняется такъ называемое каскадное включеніе, причемъ только одинъ двигатель получаетъ токъ непосредственно изъ сѣти, второй же—изъ ротора перваго. На фиг. 91 представлена схема такого включенія.



Фиг. 91.

Если число періодовъ тока, подводимаго къ I двигателю c_1, а s_1 его скольженіе, то число періодовъ тока, подводимаго къ статору II двигателя изъ ротора I будетъ (по уравн. 5)

$$c_2 = s_1 \cdot c_1$$

Вслѣдствіе электрической связи обоихъ двигателей имѣютъ мѣсто слѣдующія соотношенія. Пусть n_1 число оборотовъ поля I-го двигателя, n_2 — его ротора, p_1 — число паръ полюсовъ, то по ур. (4)

$$n_2 = n_1 \ (1 - s_1),$$

а такъ какъ по ур. (1)

$$n_1 = \frac{c_1}{p_1},$$

то

$$n_2 = \frac{c_1}{p_1} (1 - s_1) \quad \ldots \ldots \ldots (92)$$

Если n_3 число оборотовъ поля II двигателя, n_4 — его ротора, s_2 скольженіе, а p_2 число паръ полюсовъ, то подобнымъ же образомъ

$$n_4 = n_3 (1 - s_2) \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (93)$$

и такъ какъ

$$n_3 = \frac{c_2}{p_2} = \frac{s_1 c_1}{p_2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (94)$$

то

$$n_4 = s_1 \frac{c_1}{p_2} (1 - s_2) \quad \ldots \ldots \ldots (95)$$

Исключивъ s изъ уравненій (95) и (92), имѣемъ:

$$n_2 = \frac{c_1}{p_1} - \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{n_4}{1 - s_2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (96)$$

Первый членъ правой части равенъ n_1, а второй преобразуется при помощи равенства (93), тогда

$$n_3 = (n_1 - n_2) \frac{p_1}{p_2} \quad \ldots \ldots \ldots (97)$$

Если числа полюсовъ равны, то

$$n_3 = (n_1 - n_2) \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (98)$$

Изъ уравненія (96) также слѣдуетъ, что

$$s_2 = 1 - \frac{p_2 n_4}{c_1 - c_1 n_2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (99)$$

Выведемъ соотношеніе между мощностями обоихъ двигателей. Пусть:

W_1 — электрическая мощность, подведенная къ двигателю I,
W_2 — механическая мощность, отдаваемая двигателемъ I,
W_3 — электрическая мощность, подведенная къ двигателю II,
W_4 — механическая мощность, отдаваемая двигателемъ II,
V потери во вторичныхъ цѣпяхъ.

Если работаетъ одинъ первый двигатель, то V состоитъ только изъ тепловыхъ потерь въ цѣпи его ротора. При каскадномъ же включеніи, пренебрегая потерями въ мѣди и желѣзѣ, имѣемъ:

$$V_1 = W_3, \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (100)$$

такъ какъ подводимая ко второму двигателю электрическая мощность W_3 исходитъ только изъ ротора перваго.

По главѣ 7 имѣемъ

$$V_1 = s_1 W_1$$

Подобнымъ образомъ для II двигателя

$$V_2 = s_2 W_3 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (101)$$

По уравн. (100)

$$V_2 = s_2 V_1 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (102)$$

Далѣе по главѣ 7

$$V_1 = \frac{s_1}{1 - s_1} W_2 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (103)$$

И по аналогіи для II двигателя.

$$V_2 = \frac{s_2}{1 - s_2} \cdot W_4 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (104)$$

Изъ уравн. (102) и (103) слѣдуетъ

$$V_2 = \frac{s_1 s_2}{1 - s_1} W_2 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (105)$$

На основаніи двухъ послѣднихъ уравненій имѣемъ

$$W_4 = s_1 \frac{1 - s_2}{1 - s_1} W_2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad (106)$$

Но, какъ извѣстно,

$$s_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{и} \quad s_2 = \frac{n_3 - n_4}{n_3}.$$

Подставляя эти значенія въ уравн. (106), получаемъ:

$$\frac{W_4}{W_2} = \frac{n_1 - n_2}{n_3} \cdot \frac{n_4}{n_2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (107)$$

а подставляя сюда ур. (97), получимъ:

$$\frac{W_4}{W_2} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{n_4}{n_2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (108)$$

Такимъ образомъ отдаваемая обоими двигателями мощность $W_2 + W_4$ распредѣляется между ними пропорціонально произведеніямъ изъ ихъ числа полюсовъ на число оборотовъ, при равныхъ числахъ полюсовъ—пропорціонально числамъ оборотовъ.

Изъ послѣдняго уравненія имѣемъ:

$$n_2 = n_4 \cdot \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{W_2}{W_4} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (109)$$

Это значитъ, что при постоянныхъ числахъ полюсовъ, т.-е. для данныхъ двигателей, число оборотовъ I двигателя измѣняется только при измѣненіи оборотовъ II или при измѣненіи отношенія ихъ мощностей.

Если мощности должны быть одинаковы, т.-е., $W_2 = W_4$, то должно быть

$$\frac{n_4}{n_2} = \frac{p_1}{p_2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (110)$$

Другими словами, двигатели развиваютъ одинаковую мощность, если числа ихъ оборотовъ обратно пропорціональны числамъ ихъ паръ полюсовъ. Если числа паръ полюсовъ равны, то двигатели развиваютъ одинаковую мощность при равныхъ числахъ оборотовъ. Подобный случай имѣетъ мѣсто тамъ, гдѣ двигатели работаютъ на одинъ общій валъ, или если они установлены на двухъ осяхъ вагона съ одинаковыми діаметрами колесъ. Для этого случая ($W_2 = W_4$) изъ уравн. (106)

$$s_2 = 2 - \frac{1}{s_1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (111)$$

или

$$s_1 = \frac{1}{2 - s_2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (112)$$

Это уравненіе устанавливаетъ соотношеніе между скольженіями обоихъ двигателей при равенствѣ чиселъ оборотовъ. Изъ этого уравненія слѣдуетъ, что при $s_1 = 0{,}5$, т.-е. при $n_2 = \frac{n_1}{2}$, скольженіе II двигателя $s_2 = 0$, т.-е. онъ идетъ синхронно, а это возможно только при холостомъ ходѣ. Но такъ какъ по предыдущимъ разсужденіямъ мощности и обороты обоихъ двигателей равны, то первый двигатель долженъ работать въ холостую, несмотря на то, что скорость его равна половинѣ синхронной скорости. Такимъ образомъ такая каскадная система при нагрузкахъ стремится достигнуть числа оборотовъ вдвое меньшаго, чѣмъ для каждаго двигателя въ отдѣльности. Въ

этомъ уменьшеніи числа оборотовъ и заключается цѣль каскаднаго включенія асинхронныхъ двигателей.

Но и для случая, когда двигатели работаютъ съ неравнымъ числомъ оборотовъ n_2 и n_4 и неравнымъ числомъ полюсовъ, получается уравненіе аналогичное уравн. (112), именно, исключая n изъ уравненій (95) и (96), имѣемъ:

$$s_1 = \frac{1}{1 + \frac{n_2}{n_4} \cdot \frac{p_1}{p_2}(1 - s_2)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (113)$$

Это уравненіе даетъ возможность выразить вращающій моментъ, электрическую и механическую мощности каскадной системы черезъ скольженіе s_1 перваго двигателя. Далѣе, такъ какъ скорость вращенія поля 1 двигателя опредѣляется по числу полюсовъ и періодовъ тока, то можно найти число оборотовъ всей системы.

Если оба двигателя соединены такъ, что могутъ имѣть лишь одинаковое число оборотовъ ($n_4 = n_2$), то, для синхронизма, изъ послѣдняго уравненія получаемъ:

$$s_1 = \frac{1}{1 + \frac{p_1}{p_2}} = \frac{p_2}{p_2 + p_1}$$

Изъ этого равенства и уравн. (94) слѣдуетъ:

$$n_3 = \frac{V}{p_1 + p_2}$$

и такъ какъ при синхронизмѣ $n_4 = n_3$, то это и есть синхронное число оборотовъ обоихъ роторовъ (теоретическій холостой ходъ); для $p_1 = p_2$ имѣемъ $n_4 = n_3 = \frac{V}{2 p_1}$.

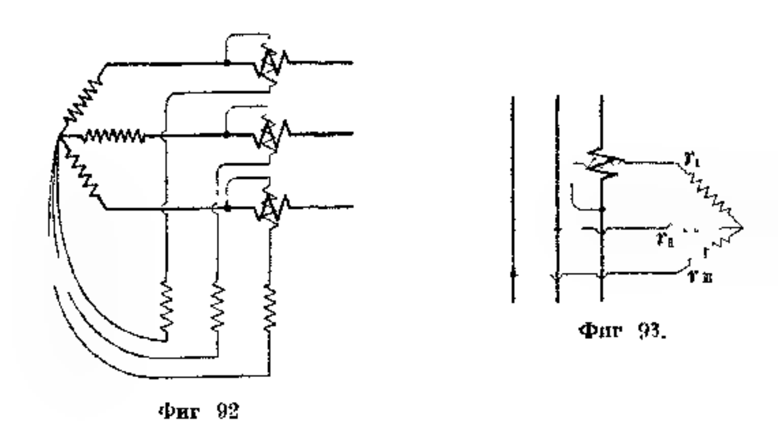
Испытаніе асинхронныхъ двигателей.

28. Измѣреніе электрической мощности и коэффиціента мощности.

Для опытнаго опредѣленія коэффиціента полезнаго дѣйствія и коэфф. мощности необходимо измѣрить потребляемую двигателемъ мощность. Такъ какъ обычно потребленіе мощности тремя фазами неодинаково, и особенно въ небольшихъ двигателяхъ, то необходимо имѣть три ваттметра, включаемые по схемѣ чертежа 92, если фазовыя обмотки соединены звѣздой

Измѣряя одновременно фазные токи и напряженія, получаемъ и коэффиціентъ мощности дѣленіемъ мощности одной фазы

на ен вольтъ-амперы. Если полученныя, такимъ образомъ, величины неодинаковы, то для коэфф мощности принимается среднее изъ полученныхъ значеній. При постоянной нагрузкѣ двигателя и при постоянномъ напряженіи на зажимахъ достаточно одного ваттметра, включаемаго послѣдовательно въ каждый изъ проводовъ. При одинаковомъ потребленіи мощности въ фазахъ, въ чемъ можно убѣдиться по равенству въ нихъ токовъ и напряженій, достаточно произвести измѣреніе въ одной фазѣ. Равенство только токовъ или только напряженій не служитъ признакомъ одинаковаго потребленія мощности въ фазахъ. Если сопротивленія вольтовыхъ обмотокъ ваттметра одинаковы (фиг. 92), то нѣтъ необходимости присоединять ихъ къ нулевой точкѣ двигателя. Соединяя ихъ между собой, мы также получимъ нулевую точку. Этимъ слѣдуетъ пользоваться, если нулевая точка двигателя недоступна, или если фазы его соединены треугольникомъ. Если имѣется



Фиг 92

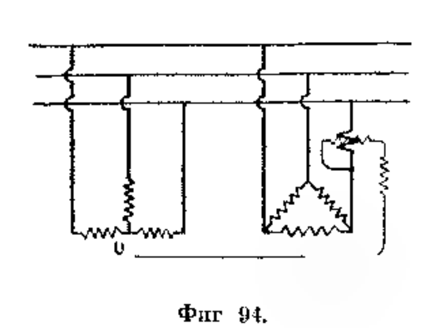
Фиг 93.

только одинъ ваттметръ, то нулевую точку получаютъ при помощи вспомогательныхъ сопротивленій (фиг. 93) Каждое изъ нихъ (r_{II} r_{III}) должно равняться общему сопротивленію вольтовой обмотки ваттметра и добавочнаго сопротивленія (r_I).

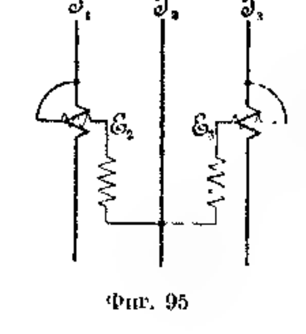
Въ такихъ случаяхъ слѣдуетъ и фазное напряженіе измѣрять, создавая искусственную нулевую точку. По напряженію въ сѣти можно вычислить фазное напряженіе, зная соотношеніе между ними. При синусоидальной формѣ кривыхъ тока и напряженія оно равно 1,732. При соединеніи звѣздой гармоническія третьяго порядка появятся въ линейномъ напряженіи (напряженіе между фазами) лишь тогда, когда нулевыя точки генератора и двигателя соединены между собою или заземлены, что иногда примѣняется при установкахъ высокаго напряженія. Въ противномъ случаѣ эти составляющія пропадаютъ въ самой обмоткѣ генератора и не попадаютъ въ сѣть. Тоже справедливо и для гармониче-

скихъ 9 и 15 порядковъ. Напротивъ члены 5, 7 и 11 порядковъ встрѣчаются вездѣ. Членами еще высшихъ порядковъ по ихъ малости можно пренебречь.

Итакъ, для опредѣленія коэфф. мощности необходимо измѣрять фазное напряженіе. Если двигатель не имѣетъ нейтральной точки, или она недоступна, необходимо примѣнить методъ искусственной нейтральной точки, какъ указано выше. Вмѣсто созданія искусственной нейтральной точки можно пользоваться нейтральной точкой приключеннаго къ той же сѣти двигателя или трансформатора (фиг. 94). Но это допустимо, если въ немъ имѣется дѣйствительная нейтральная точка, т.-е. когда въ немъ всѣ три фазы одинаково нагружены, а токъ вольтовой обмотки ваттметра очень малъ сравнительно съ фазнымъ токомъ.



Фиг 94.



Фиг. 95

Для измѣренія мощности двигателя съ неравномѣрной нагрузкой фазъ и неравными напряженіями можно пользоваться методомъ двухъ ваттметровъ (фиг. 95). Мгновенная мощность трехфазнаго тока

$$w = i_1 e_2 \pm i_3 e_3 ,$$

гдѣ i и e мгновенныя значенія соотвѣтственныхъ токовъ и напряженій. Для полученія дѣйствующихъ значеній слѣдуетъ принять во вниманіе сдвигъ фазъ между ними. Такимъ образомъ, полная дѣйств. мощность трехфазнаго тока

$$W = \mathfrak{J}_1 \mathfrak{E}_2 \cos \alpha \pm \mathfrak{J}_3 \mathfrak{E}_3 \cos \gamma .$$

При этомъ сумма показаній обоихъ ваттметровъ берется при отклоненіи ихъ въ одну сторону, разность же при отклоненіи въ противоположныя стороны. Послѣднее бываетъ, когда уголъ α или γ больше 90^0. Если сдвигъ тока относительно фазнаго напряженія при соединеніи звѣздой равенъ φ, то

$$\alpha = \varphi + 30 \quad \text{и} \quad \gamma = \varphi - 30.$$

Если α больше 90^0, т.-е φ больше 60^0, то соотвѣтственный ваттметръ даетъ отклоненіе въ обратную сторону, и его показанія слѣдуетъ вычитать изъ показаній другого ваттметра. Если ваттметры имѣютъ одностороннюю шкалу, то, при отклоненіи въ обратную сторону, необходимо переключить тонкую или толстую обмотку ваттметра.

Методъ двухъ ваттметровъ примѣнимъ и въ случаѣ различныхъ формъ кривыхъ тока и линейнаго напряженія, такъ какъ на величину мощности и на показанія ваттметра вліяютъ только тѣ гармоническія линейнаго напряженія, какія имѣются и въ токѣ. Для опредѣленія же коеффиціента мощности необходимо измѣрять фазное напряженіе.

Если въ двигателѣ съ соединеніемъ фазъ звѣздой нейтральная точка соединена съ таковой же источника тока (генератора или трансформатора) или другого двигателя или если онѣ обѣ заземлены, то при не вполнѣ синусоидальной формѣ кривой напряженія методъ двухъ ваттметровъ не примѣнимъ, такъ какъ онъ даетъ невѣрныя результаты. Въ этомъ случаѣ въ обмоткѣ двигателя могутъ быть токи высшихъ (3 и 9) порядковъ, которые не учитываются ваттметрами, такъ какъ ихъ нѣтъ въ линейномъ напряженіи. Въ такомъ случаѣ и измѣреніе однимъ ваттметромъ съ искусственной нейтральной точкой (фиг. 93) даетъ невѣрныя результаты, если нейтральная точка не соединена съ землей или съ нейтральнымъ проводомъ. Но при существованіи дѣйствительной нейтральной точки нѣтъ необходимости дѣлать измѣренія по этому способу.

При синусоидальной формѣ кривой и равномѣрной нагрузкѣ фазъ можно вычислить коэффиціентъ мощности по однимъ показаніямъ двухъ ваттметровъ, не измѣряя тока и напряженія, по слѣдующей формулѣ:

$$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3}\,\frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2} \quad \ldots \ldots \ldots (114)$$

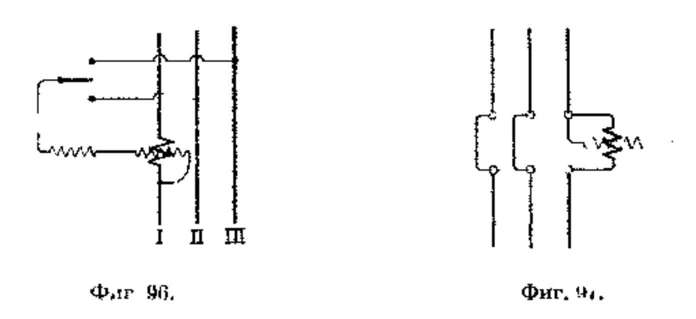
гдѣ x_1 и x_2 показанія ваттметровъ; отсюда

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi}}.$$

Это соотношеніе справедливо и тогда, когда толстая обмотка включена въ проводникъ 1 (фиг. 96), а тонкая обмотка можетъ переключаться на второй и третій проводники. При отступленіи формъ кривыхъ отъ синусоиды формула (114) даетъ невѣрные результаты. Но имъ можно пользоваться для опредѣленія отклоненія данной формы кривой отъ синусоиды, сравнивая дѣйствительный коеффиціентъ мощности съ вычисленнымъ по форм. (114).

При постоянной нагрузкѣ двигателя методъ двухъ ваттметровъ можетъ быть осуществленъ и при одномъ ваттметрѣ

переключеніемъ его безъ перерыва тока изъ одной фазы въ другую (по схемѣ фиг. 97). Можно также измѣрить однимъ



Фиг 96. Фиг. 97.

ваттметромъ послѣдовательно нагрузку трехъ фазъ по схемѣ фиг 92—93.

29. Опредѣленіе механической мощности и коэффиціента полезнаго дѣйствія.

Опредѣленіе полезной мощности, необходимой для вычисленія коэффиціента полезнаго дѣйствія, производится при помощи тормаза или аналогичнаго механическаго приспособленія, или соединеніемъ двигателя съ генераторомъ. Измѣряя электрическую мощность отдаваемую послѣднимъ и принимая во вниманіе его коэффиціентъ полезнаго дѣйствія, получимъ полезную мощность двигателя. При соединеніи ременной передачей нужно установить не существуетъ ли замѣтнаго скольженія ремня Скольженіе выражается такъ:

$$s = \frac{c_1 - c_2}{c_1},$$

гдѣ c_1 - окружная скорость шкива двигателя, а c_2 — генератора. По уравненію 11

$$V = \frac{s}{1-s} W_2,$$

получимъ потери V отъ скольженія, причемъ W_2 потребляемая генераторомъ механическая мощность.

При непосредственномъ соединеніи двигателя съ генераторомъ скольженія, очевидно, не существуетъ. Способъ опредѣленія полезной мощности изъ круговой діаграммы опытомъ короткаго замыканія и холостого хода былъ указанъ въ главѣ 19. Если короткое замыканіе при нормальномъ напряженіи не осуществимо, вслѣдствіе недостатка источника тока,

то необходимо сдѣлать измѣренія для меньшихъ напряженій, построить кривыя и продолжить ихъ до величинъ, соотвѣтствующихъ нормальному напряженію. Такимъ образомъ очевидно получимъ лишь приближенныя величины (ср. гл. 33).

Болѣе точныя величины для построенія діаграммы получаются, если вмѣсто короткаго замыканія возьмемъ точку соотвѣтствующую наибольшей нагрузкѣ (фиг. 72). По ней и точкѣ холостого хода можно построить окружность. Кругъ моментовъ получится, если отложить отрѣзокъ AH = мощности при этой нагрузкѣ $m r_1 J^2$. Пересѣченіемъ параллели HG съ AP найдемъ точку G, принадлежащую кругу моментовъ. Кругъ мощностей найдется подобнымъ же образомъ послѣ опредѣленія потерь въ мѣди однимъ изъ приведенныхъ въ слѣдующей главѣ способовъ. Отсюда опредѣлится ваттная составляющая тока ротора. Отложивъ отрѣзокъ GP, равный послѣдней (фиг. 74), проводятъ параллель PN. Точка N пересѣченія ея съ AT принадлежитъ кругу мощностей.

Наконецъ мощность W_n и коэффиціентъ полезнаго дѣйствія можно опредѣлить нахожденіемъ отдѣльныхъ потерь. Если при нѣкоторой нагрузкѣ общее потребленіе мощности Q, то полезная мощность, по главѣ 12,

$$W_n = Q - R - G - H - V,$$

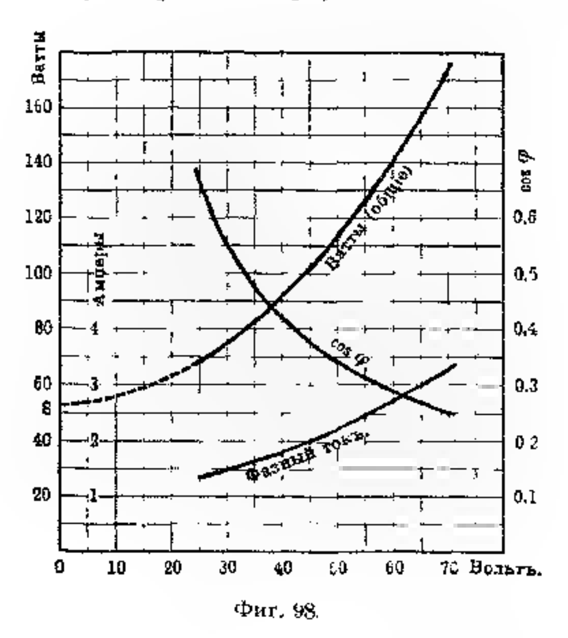
гдѣ R потери на треніе, G — потери въ желѣзѣ, потери въ мѣди статора H и ротора V. Сумму $R + G$ называютъ потерями холостого хода и онѣ приблизительно равны мощности, потребляемой двигателемъ при холостомъ ходѣ. Опытное опредѣленіе отдѣльныхъ потерь будетъ разсмотрѣно въ слѣдующихъ главахъ, а ихъ вычисленіе въ главахъ 40—42.

30. Потери холостого хода.

Потребленіе энергіи при холостомъ ходѣ складывается изъ потерь R на треніе о воздухъ, въ подшипникахъ и въ щеткахъ (если онѣ имѣются), потерь въ желѣзѣ статора и ротора G, потерь въ мѣди статора H и въ мѣди ротора V. Потерями холостого хода обычно называютъ только потери на треніе и въ желѣзѣ $R + G$, такъ какъ онѣ при всѣхъ нагрузкахъ, въ предѣлахъ нормальной работы почти постоянны. Потери же въ мѣди $H + V$ при холостомъ ходѣ входятъ въ потери въ мѣди при любой нагрузкѣ, а потому, если учитывать ихъ для холостого хода, то при опредѣленіи потерь въ мѣди для нагрузокъ слѣдуетъ вычитать потери въ мѣди холостого хода изъ общихъ потерь. Вообще же онѣ такъ малы, что ими можно пренебречь. При расчетѣ двигателя важно знать отдѣльно потери на треніе R и потери въ желѣзѣ G, такъ какъ онѣ зависятъ отъ различныхъ факторовъ, напр., при шестиполюсномъ и восьмиполюс-

номъ двигателяхъ съ одинаковыми желѣзными массами и при одинаковыхъ магнитныхъ насыщеніяхъ потери въ желѣзѣ однѣ и тѣ же, потери же на треніе въ первомъ случаѣ больше, вслѣдствіе большаго числа оборотовъ.

Самый старый способъ раздѣленія этихъ потерь состоитъ въ томъ, что измѣряется мощность, потребляемая двигателемъ при холостомъ ходѣ при постоянной частотѣ тока, но при различныхъ напряженіяхъ отъ нормальнаго внизъ до такого, при которомъ потребляемая мощность наименьшая, но двигатель еще не останавливается; затѣмъ строится кривая мощностей (фиг. 98), которая продолжается до пересѣченія съ осью ординатъ (на черт. пунктиръ).



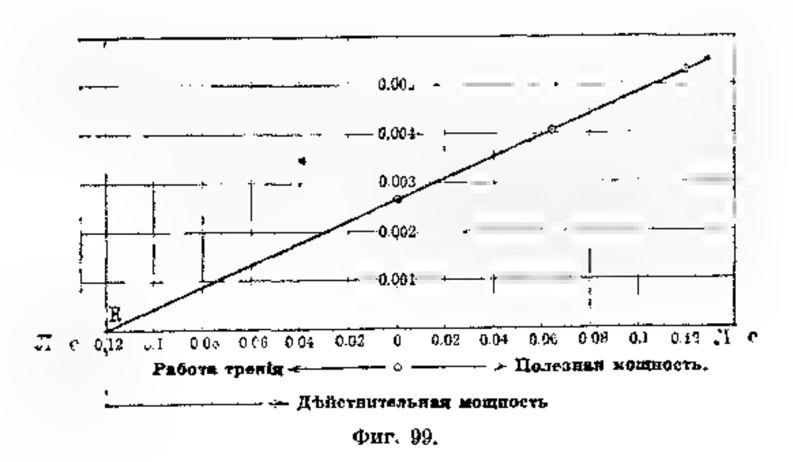
Фиг. 98.

Уменьшеніе расхода мощности происходитъ вслѣдствіе уменьшенія потерь въ желѣзѣ съ уменьшеніемъ намагничиванія, въ то время какъ потери на треніе почти постоянны, такъ какъ число оборотовъ почти постоянно.

Кривая эта пересѣкаетъ ось ординатъ въ точкѣ S, т. е. потери OS соотвѣтствовали бы холостому ходу двигателя, при напряженіи нуль, при которомъ потерь въ желѣзѣ не было бы, а были бы лишь потери на треніе. Но опытъ показалъ, что дѣйствительныя потери на треніе всегда больше потерь, опредѣленныхъ этимъ способомъ. Причина заключается въ томъ, что потери на треніе непостоянны, а уменьшаются съ уменьшеніемъ напряженія, особенно, если послѣднее станетъ меньше нѣкоторой опредѣленной величины. Но положеніе точки S

зависитъ непосредственно отъ нижней части кривой, такъ какъ S получается при ея продолженіи. Уменьшеніе потерь на треніе съ напряженіемъ имѣетъ нѣсколько причинъ. Во-первыхъ, число оборотовъ при напряженіи ниже опредѣленнаго значительно падаетъ, такъ какъ тогда вращающій моментъ такъ малъ, что треніе представляетъ уже замѣтную нагрузку, вслѣдствіе чего скольженіе значительно возрастаетъ, во-вторыхъ, вслѣдствіе уменьшенія магнитныхъ силъ условія работы подшипниковъ другія, въ-третьихъ, исчезаютъ вибраціи, вызываемыя періодическимъ намагничиваніемъ. Хотя послѣднія не представляютъ, строго говоря, потерь на треніе, но все же должны быть отнесены по существу къ потерямъ механическимъ.

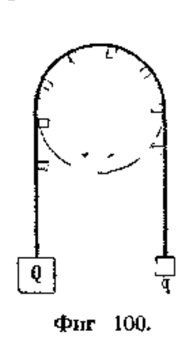
Точно опредѣлить потери на треніе при нормальныхъ условіяхъ работы можно по слѣдующему способу, предложенному авторомъ. Согласно гл. 12 (Ур. 41—42) при очень малыхъ нагрузкахъ асинхроннаго двигателя, какъ дѣйствительная мощность W_2, такъ и вращающій моментъ пропорціональны скольженію. Хотя въ этихъ уравненіяхъ принятъ во вниманіе только моментъ отъ индуктированныхъ въ роторѣ токовъ, а отъ остаточнаго магнитизма не учтенъ, все же пропорціональность остается, такъ какъ, по главѣ 11, вращающій моментъ отъ остаточнаго магнитизма пропорціоналенъ скольженію. Изъ фиг. 21 также видно, что скольженіе въ началѣ представляетъ прямую. Положеніе этой прямой можно найти, измѣряя скольженіе при холостомъ ходѣ и очень малой нагрузкѣ (0,064 *PS*, 0,12 *PS* на фиг. 99). Нанеся эти точки въ координатной системѣ проводимъ



Фиг. 99.

черезъ нихъ прямую до пересѣченія съ осью абсциссъ въ точкѣ R, въ которой скольженіе, а значитъ и дѣйствительная мощность, равно нулю. Такъ какъ при холостомъ ходѣ мощность идетъ только на треніе, то отрѣзокъ RO (влѣво отъ нуля) представляетъ дѣйствительныя потери на треніе въ

масштабѣ полезной мощности. Какъ видно потери на треніе въ этомъ примѣрѣ, относящемся къ вышеупомянутому двухсильному двигателю, равны 0,12 *PS* или 88 ваттамъ. Измѣреніе полезной мощности и скольженія въ данномъ случаѣ должно производиться точно. Для измѣренія скольженія слѣдуетъ примѣнять одинъ изъ непосредственныхъ способовъ, указанныхъ въ главѣ 32. Измѣреніе полезной мощности производится при помощи простого тормаза, или посредствомъ ремня или шнура наложеннаго на шкивъ. Чтобы ремень не соскакивалъ его необходимо снабдить полосками изъ жести, прикрѣпленнымъ къ краямъ ремня и выступающимъ съ боковъ шкива, какъ показано на фиг. 100. Если для равновѣсія тормаза (или ремня) требуется съ одной стороны грузъ q, съ другой Q, то полезная мощность.



Фиг 100.

$$W = \frac{2\pi n_2 d\ (Q - q)}{2 \, . \, 75} \text{ лош. силъ.}$$

гдѣ d—діаметръ шкива, а n_2 число оборотовъ ротора въ секунду.

Для такихъ измѣреній особенно пригодны индукціонные тормаза.

При продолжительныхъ опытахъ слѣдуетъ имѣть въ виду, что треніе въ подшипникахъ измѣняется съ временемъ, не только послѣ короткой, но и послѣ продолжающейся годами работы. Такія измѣненія сказываются въ особенности по истеченіи короткаго времени, вслѣдствіе нагрѣванія масла, расширенія подшипниковъ и т. д., такъ что при большихъ двигателяхъ стаціонарное состояніе достигается часто лишь послѣ 10-ти-часовой работы.

Потери на треніе [1]) двигателя можно приблизительно опредѣлить, приводя его въ движеніе съ нормальнымъ числомъ оборотовъ при помощи небольшого вспомогательнаго двигателя. При этомъ испытуемый двигатель долженъ быть включенъ въ нормальное напряженіе, чтобы магнитное состояніе его соотвѣтствовало нормальной работѣ. Для устраненія собственнаго вращающаго момента обмотка ротора его должна быть разомкнута, такъ что этотъ способъ можетъ быть примѣненъ лишь къ двигателямъ съ кольцами. Если измѣрить мощности потребляемыя вспомогательнымъ двигателямъ при

[1]) Такъ называемый методъ выбѣга, основанный на томъ, что двигатель на ходу выключается изъ сѣти и продолжаетъ вращаться, пока его живая сила не будетъ поглощена треніемъ, даетъ невѣрные результаты, такъ какъ при этомъ отсутствуетъ намагничиваніе, и окончательный результатъ опредѣляется въ зависимости отъ тренія при малыхъ скоростяхъ, между тѣмъ какъ нужна зависимость отъ тренія при нормальной скорости. Если же приключить двигатель къ сѣти, то живая сила будетъ поглощаться не только треніемъ, но и токами Фуко, т. е. результатъ будетъ опять невѣренъ

его нагрузкѣ испытуемымъ двигателемъ и при холостомъ ходѣ, то разность этихъ мощностей представляетъ потери на треніе въ испытуемомъ двигателѣ. При этомъ, конечно, слѣдуетъ оба двигателя соединить такимъ образомъ, чтобы не было потерь въ самомъ сцѣпленіи ихъ.

Вычитая изъ мощности, идущей на холостой ходъ двигателя при разомкнутомъ роторѣ потери на треніе и потери въ мѣди статора, получимъ потери въ желѣзѣ (статора и ротора). При описанномъ выше двухсильномъ двигателѣ на холостой ходъ расходовалось 160 ваттъ, потери въ мѣди статора — 5 ваттъ, а потери на треніе 88 ваттъ. Слѣдовательно потери въ желѣзѣ равны 160 — 5 — 88 — 67 ваттамъ. Для двигателей съ кольцами потери въ желѣзѣ можно опредѣлить приближенно, размыкая мгновенно цѣпь ротора при холостомъ ходѣ двигателя и замѣчая мощность, потребляемую имъ тотчасъ послѣ размыканія. Мощность эта идетъ лишь на покрытіе потерь въ желѣзѣ и потерь въ мѣди статора, такъ какъ работа тренія совершается за счетъ живой силы ротора. Потери въ мѣди статора могутъ быть вычислены по силѣ тока и сопротивленію обмотки. Опредѣленныя этимъ способомъ потери въ желѣзѣ того же двигателя равнялись 62 ваттамъ.

Такъ какъ роторъ при холостомъ ходѣ вращается почти синхронно съ полемъ, а при нормальной нагрузкѣ имѣетъ скольженіе не больше 0,08, то число періодовъ тока и потока въ роторѣ очень незначительно. Въ виду того, что потери на гистерезисъ зависятъ отъ первой степени, а на токи Фуко отъ второй степени числа періодовъ, то потери въ желѣзѣ очень незначительны. Поэтому потери въ желѣзѣ, измѣренныя при холостомъ ходѣ, представляютъ лишь потери въ статорѣ. Потери въ двигателѣ при разомкнутомъ роторѣ, т. е. когда онъ находится въ покоѣ, казалось бы, должны быть значительно больше потерь въ желѣзѣ при холостомъ ходѣ, такъ какъ частота потока въ роторѣ такъ же велика, какъ и въ статорѣ, но опытъ показалъ, что въ большинствѣ случаевъ потери эти того же порядка (для даннаго двигателя 72 ватта), а иногда и меньше, чѣмъ потери при холостомъ ходѣ. Причина въ томъ, что при вращеніи ротора въ зубцахъ происходитъ измѣненіе силы поля съ большой частотой. Индукція наибольшая тогда, когда край зубца статора приходится надъ срединой зубца ротора, а наименьшая при положеніи зубцовъ другъ противъ друга. Если, напр., статоръ имѣетъ 48 зубцовъ, то при одномъ оборотѣ каждый зубецъ ротора пройдетъ мимо 48 зубцовъ статора и, такимъ образомъ, испытаетъ 2.48 перемѣнъ между максимумомъ и минимумомъ. Индукція эта даетъ при 25 оборотахъ въ секунду 2.48.25 = 2400 перемѣнъ или 1200 періодовъ намагничиванія. Если роторъ имѣетъ 60 зубцовъ, то для зубцовъ статора будемъ имѣть 2.60.25 = 3000 перемѣнъ или 1500 періодовъ. Отсюда слѣдуетъ, что потери въ зубцахъ должны быть значительны, несмотря на малый объемъ желѣза въ нихъ.

31. Опредѣленіе потерь въ мѣди.

Для опредѣленія потерь въ мѣди статора $mr_1\mathfrak{J}_1^2$ при любой нагрузкѣ необходимо измѣрить сопротивленіе одной фазы обмотки статора r_1 и фазный токъ статора. Такимъ же образомъ можно опредѣлить и потери въ мѣди ротора $V = mr_2\mathfrak{J}_2^2$, если у него обмотка фазовая. Хотя при включеніи амперметра въ цѣпь ротора сопротивленіе ротора и увеличивается, но сила тока измѣняется отъ этого незначительно, такъ какъ при этомъ увеличивается и скольженіе, а значитъ и вторичная эл. движ. сила. Конечно для r_2 нужно считать сопротивленіе одной обмотки безъ сопротивленія амперметра. При малыхъ нагрузкахъ измѣреніе затруднено тѣмъ, что амперметръ слѣдуетъ за измѣненіемъ тока и не даетъ дѣйствующихъ значеній. При большихъ нагрузкахъ токъ ротора можно вычислить по формулѣ

$$\mathfrak{J}_2 = \frac{\mathfrak{J}_1 w_1}{w_2},$$

такъ какъ при этомъ первичные и вторичные ампервитки приблизительно равны между собою. Такимъ образомъ найдемъ, напр. для вышеупомянутаго въ гл. 34 двигателя, кривыя котораго изображены на фиг. 20, при нагрузкѣ въ 2 лош. с., токъ

$$\mathfrak{J}_2 = \frac{10.104}{50} = 20{,}8 \text{ амп.}$$

Отсюда получимъ масштабъ для вектора $\overline{SA}$ въ круговой діаграммѣ фиг. (70 и 77), посредствомъ котораго для каждой нагрузки можно опредѣлить значенія $\mathfrak{J}_2$ изъ діаграммы. Тамъ гдѣ подобные способы опредѣленія не примѣнимы, особенно при коротко-замкнутыхъ роторахъ, необходимо опредѣлить потери V въ мѣди ротора по форм. 10

$$V = sW_1$$

или по форм 11

$$V = \frac{s}{1-s}W_2$$

W_1 —мощность передаваемая статоромъ ротору, т.-е. мощность потребляемая двигателемъ за вычетомъ потерь съ желѣзѣ и потерь въ мѣди статора, а W_2—дѣйствительная мощность двигателя (включая потери на треніе). Первой формулой пользуются, когда желаютъ опредѣлить потери въ мѣди ротора для опредѣленной потребленной двигателемъ мощности, а вто-

рой когда желаютъ опредѣлить V для опредѣленной мощности двигателя.

Напримѣръ изъ фиг. 20 по полезной мощности 2 лош. с. найдемъ дѣйствительную мощность 2,12 лош. с. Изъ той же фиг. скольженіе равно 0,059 и по послѣдней формулѣ

$$V = \frac{0,059}{0,941} \cdot 2,12 = 0,133 \text{ лош. с.} = 98 \text{ ваттъ.}$$

Если исходить изъ передаваемой ротору мощности W_1, то получимъ потери слѣдующимъ образомъ. Потребленіе энергіи при полезной мощности въ 2 лош. силы по фиг. 20 равно 1800 ваттамъ, потери въ желѣзѣ, по стр. 103, равны 67 ваттамъ, а потери въ мѣди статора при $\mathfrak{J}_1 = 10$ амп. будутъ

$$3 \cdot 0,186 \cdot 10^2 = 56 \text{ ваттъ.}$$

Поэтому

$$W_1 = 1800 - 67 - 56 = 1677 \text{ ваттъ}$$

и

$$V = 0,059 \cdot 1677 = 99 \text{ ваттъ,}$$

т.-е. результатъ такой же, какъ предыдущій.

Отсюда можно вычислить вторичный токъ, зная сопротивленіе обмотки ротора (щетокъ и соединительныхъ проводовъ):

$$\mathfrak{J}_2 = \sqrt{\frac{V}{3\, r_2}} = \sqrt{\frac{99}{3 \cdot 0,08}} = 20,7 \text{ амп.}$$

Этотъ результатъ согласуется съ найденнымъ выше изъ условія равенства чиселъ первичныхъ и вторичныхъ ампервитковъ.

Если потери въ мѣди ротора нужны лишь для нахожденія коэфф. пол. дѣйствія двигателя, то въ вышеприведенныя формулы можно подставить вмѣсто W_2 полезную мощность W_n, а вмѣсто W_1 потребляемую мощность. Происходящая вслѣдствіе этого ошибка вліяетъ на коэффиціентъ полезнаго дѣйствія очень незначительно.

32. Измѣреніе скольженія.

Какъ видно изъ предыдущаго въ измѣреніи скольженія очень важна точность. Согласно главѣ 6

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

гдѣ n_1 — число оборотовъ поля или синхронное число оборотовъ ротора, а n_2 — его дѣйствительное число оборотовъ. n_1 по-

лучается дѣленіемъ числа періодовъ подводимаго къ двигателю тока на число паръ полюсовъ. Число періодовъ опредѣляется по числу оборотовъ генератора или синхроннаго двигателя, приключеннаго къ той же сѣти. Если это невозможно, то оно опредѣляется частотомѣромъ. Приблизительно оно можетъ быть опредѣлено по числу оборотовъ нашего двигателя при его холостомъ ходѣ. Число оборотовъ ротора n_2 опредѣляется счетчикомъ. Такое опредѣленіе числа оборотовъ двигателя достаточно точно для опредѣленія мощности двигателя тормаженіемъ. Но для опредѣленія скольженія въ двигателяхъ съ большимъ числомъ оборотовъ (свыше 600) такой способъ недостаточенъ, такъ какъ ошибка въ числѣ оборотовъ вызываетъ относительно большую ошибку въ скольженіи. Покажемъ это на примѣрѣ. Синхронное число оборотовъ четырехполюснаго двигателя при 50 періодахъ будетъ 1500 въ минуту. Пусть при нѣкоторой нагрузкѣ опредѣленное счетчикомъ число оборотовъ 1475. Отсюда опредѣляется скольженіе

$$s = \frac{1500 - 1475}{1500} = \frac{25}{1500} = 0{,}0167$$

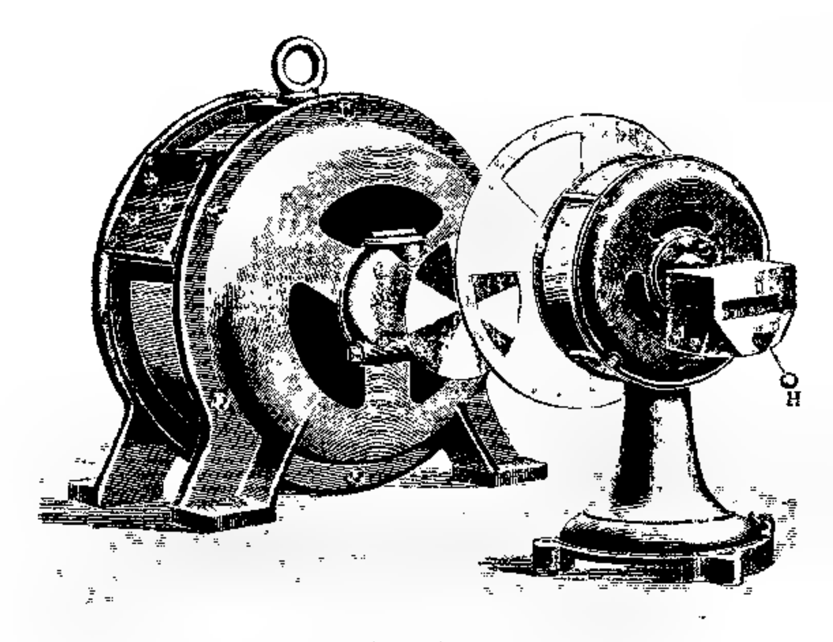
Если дѣйствительное число оборотовъ не 1475, а 1481, т.-е. если ошибка въ отсчетѣ числа оборотовъ равна 0,4%, то дѣйствительное скольженіе

$$s = \frac{1500 - 1481}{1500} = \frac{19}{1500} = 0{,}0127.$$

Слѣдовательно ошибка въ опредѣленіи скольженія равна 25%, въ то время какъ для числа оборотовъ она составляетъ только 0,4%. Поэтому слѣдуетъ измѣрять непосредственно разность числа оборотовъ поля и ротора, не находя отдѣльно уменьшаемаго и вычитаемаго. Первый способъ, дающій возможность это сдѣлать былъ предложенъ авторомъ и состоитъ въ слѣдующемъ.

На концѣ вала или на лобовой сторонѣ ротора насаживается дискъ съ бѣлыми и черными секторами и освѣщается вольтовой дугой, питаемой отъ той же сѣти, что и двигатель. Пока роторъ вращается синхронно съ полемъ сектора кажутся неподвижными. Какъ только роторъ начинаетъ отставать, то по извѣстному стробоскопическому явленію, сектора начинаютъ вращаться въ противоположную ротору сторону. Заставивъ какъ-либо вращаться роторъ скорѣе поля, мы увидимъ сектора вращающимися уже въ направленіи вращенія ротора. Если стробоскопическое изображеніе повернулось въ минуту на одинъ оборотъ, то роторъ отсталъ отъ поля на одинъ оборотъ, т.-е. $n_1 - n_2 = 1$. Такимъ образомъ, для опредѣленія скольженія необходимо только сосчитать число оборотовъ стробоскопическаго изображенія въ единицу времени. Такъ

какъ при наблюденіи числа полныхъ оборотовъ диска легко ошибиться, то лучше всего считать прохожденіе секторовъ черезъ неподвижную точку пространства. При дискѣ съ четырьмя секторами четыре такихъ прохожденія соотвѣтствуютъ разности оборотовъ въ единицу. Точнѣе всего измѣрять хронометромъ время, соотвѣтствующее опредѣленному числу такихъ прохожденій. При большихъ скольженіяхъ (больше 0,06) отсчеты при четырехъ секторахъ затруднительны вслѣдствіе быстраго ихъ прохожденія. Въ этомъ случаѣ лучше взять дискъ съ однимъ или двумя секторами. Иногда невозможно имѣть вольтову дугу включенной въ одну и ту же сѣть съ двигателемъ не вызывая различія въ напряженіяхъ фазъ трехфазной сѣти.



Фиг. 0.

Тогда для освѣщенія диска можно пользоваться и лампой накаливанія. При этомъ необходимо лишь затемнить помѣщеніе, такъ какъ колебанія силы свѣта лампы накаливанія незначительны.

На томъ же принципѣ основанъ измѣритель скольженія автора. Онъ состоитъ изъ маленькаго синхроннаго двигателя, который трогается съ мѣста безъ особыхъ приспособленій. На одномъ концѣ его вала находится дискъ съ вырѣзанными секторами (фиг. 101), на другомъ счетный механизмъ. Послѣдній приводится въ дѣйствіе червячной передачей и можетъ включаться и выключаться рычагомъ *H*. Къ испытуемому двигателю прикрѣ-

пляется стробоскопическій дискъ съ бѣлыми и черными секторами (его можно прилѣпить къ концу вала воскомъ). Если смотрѣть на него черезъ прорѣзы диска вращаемаго синхроннымъ двигателемъ, то сектора кажутся вращающимися. Число прохожденій секторовъ черезъ неподвижную точку пространства можно легко сосчитать и такимъ образомъ опредѣлить разность $n_1 - n_2$. Одновременно по показаніямъ счетчика найдемъ число оборотовъ поля n_1. Если двигатель счетчика и испытуемый двигатель имѣютъ одинаковыя числа полюсовъ, то отсчетъ по счетчику даетъ непосредственно n_1. Иначе необходимо его вычислить, принявъ во вниманіе отношеніе числа полюсовъ. Число секторовъ дисковъ должно быть выбрано такъ, чтобы произведенія изъ числа полюсовъ двигателя на число секторовъ его диска были для обоихъ двигателей одинаковы. Далѣе простымъ дѣленіемъ получимъ скольженіе; при этомъ способѣ не нужно измѣрять время. Только величины n_1 и $n_1 - n_2$ должны быть опредѣлена для одинаковаго промежутка времени. Для этого при началѣ стробоскопическаго отсчета включается и счетчикъ. Если дискъ испытуемаго двигателя имѣетъ m секторовъ, то число прохожденій нужно раздѣлить на m для полученія $n_1 - n_2$; если дискъ имѣетъ одинъ секторъ, то число прохожденій даетъ прямо эту разность. Это рекомендуется въ случаѣ большого скольженія, когда отдѣльные сектора вращаются черезчуръ быстро. Дискомъ съ однимъ секторомъ можно измѣрить скольженіе, значительно большее, чѣмъ при всѣхъ другихъ случаяхъ. При очень малыхъ скольженіяхъ, напр. при холостомъ ходѣ двигателя лучше примѣнять дискъ съ числомъ секторовъ большимъ числа полюсовъ и кратнымъ ему, что бы прохожденія слѣдовали быстрѣе и могли быть точнѣе отсчитаны.

Если включить амперметръ съ хорошимъ успокоеніемъ и малымъ моментомъ инерціи подвижной части его въ цѣпь ротора (между кольцами и пусковымъ реостатомъ), то число колебаній его покажетъ число періодовъ тока ротора. Если это приборъ съ подвижной рамкой для постояннаго тока (типъ Депрэ-д'Арсонваля), то положительное направленіе тока вызоветъ отклоненіе вправо, отрицательное — влѣво. Сосчитавъ число отклоненій въ одну сторону, получимъ число періодовъ c_2 тока ротора. Скольженіе опредѣлится по ур. (5) $s = \frac{c_2}{c_1}$, гдѣ c_1 — число періодовъ тока сѣти. Если примѣнить динамометрическій приборъ, то отклоненія послѣдуютъ въ одну сторону. Тогда для опредѣленія числа періодовъ тока ротора слѣдуетъ число отклоненій раздѣлять на два. Такъ же будутъ дѣйствовать вольтметръ или амперметръ на малыя силы токовъ или телефонъ, приключенные къ двумъ кольцамъ. Въ телефонѣ мы услышимъ каждую перемѣну направленія тока, такъ что ихъ число нужно раздѣлить на два для полученія числа періодовъ. Телефонъ можно примѣнить также и при короткозамкнутыхъ роторахъ,

приключая его къ катушкѣ со многими витками, помѣщаемой передъ лобовой поверхностью ротора. Поле разсѣянія ротора пронизываетъ катушку и индуктируетъ въ ней токъ съ числомъ періодовъ тока ротора.

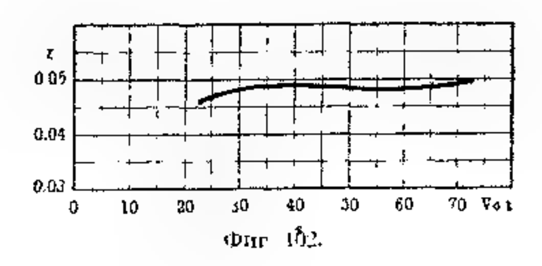
33. Измѣреніе магнитнаго разсѣянія.

Согласно главѣ (17 уравн. 76) магнитное разсѣяніе τ асинхроннаго двигателя опредѣляется отношеніемъ отрѣзковъ $SO : OT$. Если діаграмма построена по опыту холостого хода и короткаго замыканія или по величинамъ токовъ и мощностей, измѣреннымъ при двухъ различныхъ нагрузкахъ, то τ получится измѣреніемъ соотвѣтствующихъ отрѣзковъ. Способа для непосредственнаго измѣренія этого коэффиціента не существуетъ, потому что онъ не представляетъ отношенія двухъ дѣйствительно существующихъ полей. По уравненію (67)

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1\tau_2.$$

Но въ главѣ 16 τ_1 опредѣляется какъ отношеніе первичнаго поля разсѣянія къ первичному фиктивному полю; подобнымъ же образомъ опредѣлятся τ_2 для ротора

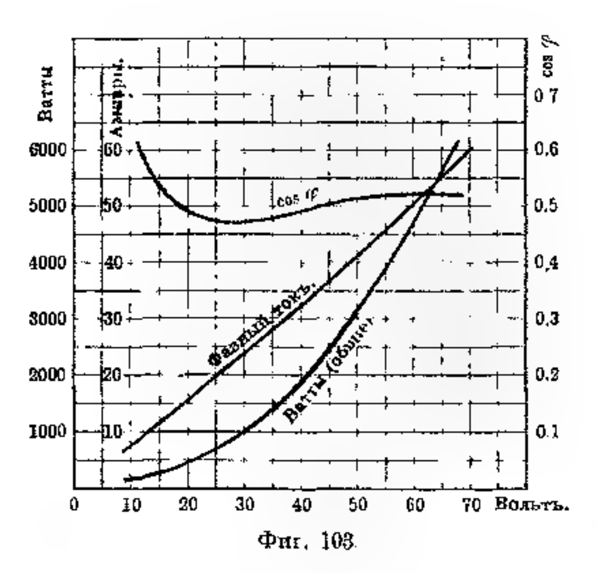
Въ случаѣ большихъ двигателей почти никогда невозможно произвести опытъ короткаго замыканія при полномъ напряженіи, потому что сѣть не въ состояніи доставить необходимаго тока. Поэтому является вопросъ, какую ошибку мы сдѣлаемъ, если построимъ діаграмму по опыту короткаго замыканія при неполномъ напряженіи и по холостому ходу и опредѣлимъ изъ нея коэффиціентъ разсѣянія. Отвѣтъ даетъ кривая фиг. 102, представляющая зависимость коэфф. разсѣянія отъ напряженія. Эта кривая получена построеніемъ круговыхъ діаграммъ для величинъ взятыхъ изъ кривыхъ холостого хода фиг. 98 и короткаго замыканія фиг. 103. Какъ видно τ измѣняется очень мало между напряженіемъ 35 и 70 вольтъ, ниже же 35 вольтъ онъ быстро падаетъ.



Фиг. 102.

Теперь ясно, что заявленіе о независимости коэффиціента разсѣянія отъ напряженія, высказанное въ главѣ 17, справедливо

лишь приблизительно. Причина этого въ томъ, что въ общее магнитное сопротивленіе входитъ не только сопротивленіе междужелѣзнаго пространства и каналовъ, но и сопротивленіе желѣза, особенно зубцовъ. Въ желѣзѣ же магнитная проницаемость измѣняется съ индукціей. Отсюда слѣдуетъ еще, что кривая фиг. 102 для различныхъ типовъ двигателей должна быть различна.



Фиг. 103.

Во всякомъ случаѣ можно утверждать, что между половиннымъ и полнымъ рабочимъ напряженіемъ коэфф. разсѣянія настолько постояненъ, что діаграмма, построенная для половиннаго напряженія будетъ справедлива и для полнаго. Для опредѣленія масштаба необходимо знать по крайней мѣрѣ токъ и мощность при холостомъ ходѣ или при какой-либо одной нагрузкѣ.

Расчетъ асинхронныхъ двигателей.

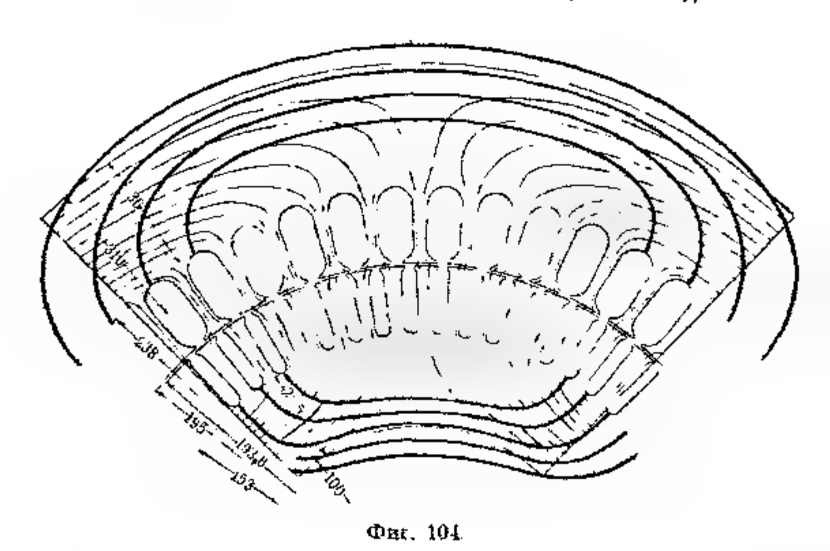
34. Расчетъ магнитной индукціи.

Какъ извѣстно между эл. дв. силой $\mathcal{E}$, числомъ витковъ катушки w и амплитудой потока ею создаваемаго существуетъ соотношеніе:

$$\mathcal{E} = 4{,}44\, c\, w\, \Phi\, 10^{-8} \text{ вольтъ.}$$

При этомъ предполагается, что потокъ измѣняется синусоидально: $\varphi = \Phi \sin wt$. Если потокъ не синусоидаленъ, то вмѣсто коэффиціента 4,44 войдетъ другой, зависящій отъ формы кри-

вой напряженія. Соотношеніе это справедливо, создается ли поле Φ токомъ рассматриваемой катушки или другими токами. Оно справедливо, поэтому, въ двигателѣ для потока Φ_1, выходящаго изъ поверхности одного полюса (Фиг. 104), для вит-



Фиг. 104.

ковъ w одной фазы одной пары полюсовъ и создаваемой этими катушками эл. дв. силы $\mathcal{E}$. На пару полюсовъ приходится вит-
[illegible]

$$w = \frac{w_1}{p} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (115)$$

если w_1 — полное число витковъ одной фазы, и p — число паръ полюсовъ. Далѣе:

$$\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_1}{p} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (116)$$

гдѣ $\mathcal{E}_1$ эл. дв. сила одной фазы. Подставляя эти величины, получимъ

$$\mathcal{E}_1 = 4{,}44\, \nu\, w_1\, \Phi_1\, 10^{-8} \text{ вольтъ}$$

Такъ какъ каждая катушка состоитъ изъ нѣсколькихъ частей соотвѣтственно числу каналовъ (на фиг. 104 ихъ четыре), то часть магнитныхъ линій не охватывается внутренними частями катушки. Поэтому послѣднее уравненіе для катушекъ, уложенныхъ въ нѣсколько каналовъ, не вполнѣ точно, и необходимо ввести въ число витковъ, коэффиціентъ k учитывающій это обстоятельство. Нахожденіе этого коэфф. для различ-

ныхъ чиселъ каналовъ—задача чисто математическая, а потому мы, не приводя самого хода вычисленій, дадимъ здѣсь лишь результаты ихъ:

Число каналовъ на фазу и полюсъ.	k — для трехфазныхъ двигателей.	k — для двухфазныхъ двигателей.
1	1,000	1,000
2	0,966	0,924
3	0,960	0,911
4	0,958	0,906
5	0,957	0,904
8	0,955	0,900

Итакъ,

$$\Phi_1 = \frac{\mathfrak{E}_1\ 10^8}{4,44\, c\, k\, w_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (117)$$

Примѣнимъ въ дальнѣйшемъ всѣ выведенные ранѣе формулы къ примѣру двигателя, размѣры котораго даны на фиг. 104. (На чертежѣ они выражены въ мм, въ формулы же входятъ въ см.) Данныя двигателя слѣдующія.

Число паръ полюсовъ $p = 2$,

Число фазъ $m = 3$,

Фазное напряженіе (соединеніе звѣздой) $\mathfrak{E}_1 = 66,5$ вольтъ,

Число періодовъ подводимаго тока $c_1 = 50$,

Длина сердечника статора $l = 8,2$ см.,

Число всѣхъ каналовъ $z_1 = 18$ (въ статорѣ), $z_2 = 60$ (въ роторѣ),

Число кан. на фазу и пол. 4 „ „ 5 „ „ ,

Число проводник въ кан. 13 „ „ 5 „ „ ,

Число проводниковъ на фазу и полюсъ или витковъ на фазу и пару полюсовъ 52 въ статорѣ и 25 въ роторѣ,

Число витковъ на фазу $w_1 = 104$ (въ статорѣ), $w_2 = 50$ (въ роторѣ).

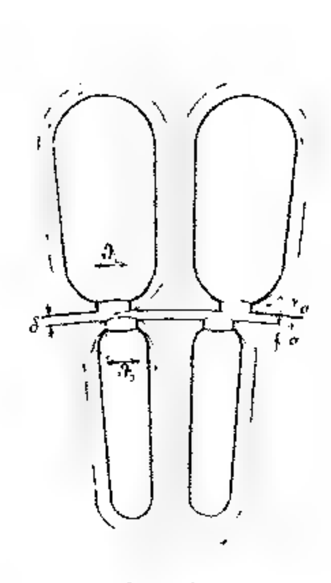
Поэтому

$$\Phi_1 = \frac{66,5.\ 10^8}{4,44.\ 50.\ 0,958.\ 104} = 301000.$$

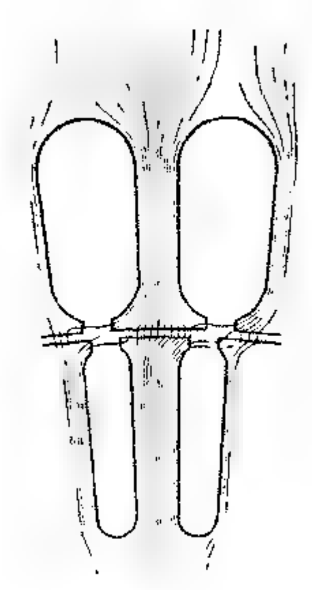
Отсюда получимъ индукцію B_l въ междужелѣзномъ пространствѣ дѣленіемъ потока на соотвѣтствующее сѣченіе. Послѣднее равно произведенію изъ дѣйствующихъ длины l и ширины b полюсной дуги. Дѣйствующая ширина дуги равна средней изъ дѣйствующей ширины полюсной дуги статора и дѣйств. ширины полюсной дуги ротора:

$$b = \frac{b_1 + b_2}{2}.$$

Дѣйствующія ширины получаются геометрическимъ вычитаніемъ изъ послѣднихъ не всей ширины ϑ зазоровъ (между головками зубцовъ) (фиг. 105) а $\vartheta - \delta$, гдѣ δ — длина междужелѣзнаго пространства, такъ какъ силовыя линіи выходятъ



Фиг. 105.



Фиг. 106.

изъ зубцовъ, какъ указано на фиг. 106. Если D обозначаетъ внутренній діаметръ статора (или внѣшній діаметръ ротора), z_1 и z_2 — число каналовъ статора и ротора, $2p$ — число полюсовъ, то

$$b = \frac{\pi D - z(\vartheta - \delta)}{2p}.$$

Для двигателя съ закрытыми каналами второй членъ пропадаетъ и остается

$$b = \frac{\pi D}{2p}.$$

для нашего примѣра размѣры зазоровъ между головками зубцовъ суть:

$$a_1 = 0{,}05 \text{ см.} \qquad a_2 = 0{,}05 \text{ см.}$$
$$\vartheta_1 = 0{,}3 \text{ „} \qquad \vartheta_2 = 0{,}3 \text{ „}$$
$$\delta = 0{,}06 \text{ см.}$$

Тогда

$$b_1 = \frac{19,5\,\pi - 48\,(0,3 - 0,06)}{4} = 12,4 \text{ см.}$$

$$b_2 = \frac{19,38\,\pi - 60\,(0,3 - 0,6)}{4} = 11,6 \text{ см.}$$

$$b = \frac{12,4 + 11,6}{2} = 12 \text{ см.}$$

Дѣйствующее сѣченіе междужелѣзнаго пространства будетъ:

$$S_l = b.\, l = 12 \,.\, 8,2 = 98 \text{ см}^2$$

Отсюда индукція въ междужелѣзномъ пространствѣ будетъ

$$B_l = \frac{301000}{98} = 3070.$$

Всѣ эти величины лучше всего собрать въ одну таблицу, что сдѣлано на страницѣ 121.

При этомъ мы оставили безъ вниманія, что не всѣ силовыя линіи статора входятъ въ роторъ, а что часть ихъ замыкается между зубцами статора (первичное разсѣяніе). Но, во-первыхъ, число ихъ невелико и, во-вторыхъ, мы дѣлаемъ предположеніе въ неблагопріятную для насъ сторону.

Индукція въ зубцахъ B_z найдется дѣленіемъ потока на дѣйствительное сѣченіе зубца. Статоръ обыкновенно составляется изъ желѣзныхъ листовъ толщиною въ 0,5 мм., оклеенныхъ бумагой толщиною въ 0,05 мм. Значитъ по длинѣ сердечника двигателя десять процентовъ составляетъ немагнитный матеріалъ. Такъ какъ желѣзные листы не совсѣмъ одинаковы и обѣ стороны ихъ покрыты слоемъ окисловъ, то изъ геометрической длины вычитаютъ обычно 12% для полученія дѣйствительной длины желѣза. Въ нашемъ случаѣ она равна 7,2 см.

Дѣйствительное сѣченіе зубца статора и именно въ его серединѣ равно [1])

$$S_{z_1} = \frac{21,7\,\pi - 1,05 .\, 48}{4} \cdot 7,2 = 32 \text{ см}^2.$$

и ротора

$$S_{z_2} = \frac{17,3\,\pi - 0,5 .\, 60}{4} \cdot 7,2 = 44 \text{ см}^2.$$

[1]) Ширина канала въ статорѣ равна 1,05 см., въ роторѣ 0,5 см.

Поэтому индукція въ зубцахъ статора равна

$$B_{z1} = \frac{301000}{32} = 9400,$$

въ зубцахъ ротора

$$B_{z2} = \frac{301000}{44} = 6850.$$

При вычисленіи индукціи въ ярмѣ замѣтимъ, что при выходѣ изъ полюса потокъ раздѣляется пополамъ (фиг. 104). Въ формулѣ сѣченіе ярма (статора) слѣдуетъ взять двойнымъ:

$$S_{k1} = 2.\ 3,6.\ 7,2 = 2.\ 26\ \text{см}^2,$$

и для сердечника ротора

$$S_{k2} = 2.\ 2,65.\ 7,2 = 2.\ 19\ \text{см}^2.$$

Поэтому индукція въ ярмѣ статора будетъ:

$$B_r = \frac{301000}{2.26} = 5800$$

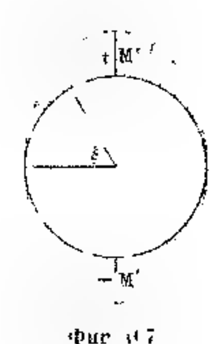
а въ сердечникѣ ротора

$$B_a = \frac{301000}{2.19} = 7900.$$

35. Магнитодвижущая сила асинхроннаго двигателя

Въ предыдущей главѣ мы видѣли какъ вычисляется потокъ, выходящій изъ одного полюса. Этотъ потокъ создается магнитодвижущей силой катушекъ двухъ или трехъ фазъ, принадлежащихъ одной парѣ полюсовъ, въ зависимости отъ типа двигателя. Уже въ главѣ 3 было указано, что для достиженія возможно равномѣрнаго результирующаго поля три поля трехфазнаго двигателя должны быть размѣщены такъ, чтобы они отчасти находили другъ на друга. Для этой цѣли катушки должны также находить другъ на друга. Если мы разсмотримъ магнитное поле, создаваемое группой катушекъ, состоящей изъ катушекъ, лежащихъ одна внутри другой, то ясно, что оно будетъ сильнѣе всего въ серединѣ, а къ краямъ будетъ ослабляться. Въ дальнѣйшемъ будемъ считать, что измѣненіе индукціи, а стало быть и магнитодвижущей силы по окружности ротора происходитъ по синусоидѣ, какъ это показано на фиг. 107 для двухполюснаго двигателя.

Пусть M_1 обозначаетъ наибольшую величину магнитодвижущей силы одной фазы, какая бываетъ въ какой-либо моментъ гдѣ-либо на окружности ротора. Тогда магнитодвижущая сила въ любой точкѣ окружности удаленной отъ точки, гдѣ она — нулю, на уголъ ξ будетъ



Фиг. 47

$$m_1 = M_1 \sin \xi.$$

Этимъ уравненіемъ опредѣляется распредѣленіе магнитодвижущей силы въ пространствѣ. Оно зависитъ отъ геометрическихъ размѣровъ зубцовъ и обмотки. независимо отъ того, постоянно-ли M_1 или нѣтъ. Если магнитодвижущая сила M_1 создается перемѣннымъ токомъ, измѣняющимся синусоидально во времени, то

$$M_1 = F_1 \sin \omega t.$$

и поэтому $m_1 = F_1 \sin \omega t \sin \xi$.

Такъ опредѣляется магнитодвижущая сила въ любомъ мѣстѣ окружности ротора и въ любой моментъ времени. Это справедливо для одной фазы. Въ случаѣ трехфазнаго двигателя магнитодвижущія силы, создаваемыя другими двумя обмотками, сдвинутыми въ пространствѣ на 120° другъ относительно друга, и токи которыхъ сдвинуты на 120° во времени, будутъ:

$$m_{II} = F_2 \sin (\omega t + 120) \sin (\xi + 120)$$

$$m_{III} = F_3 \sin (\omega t + 240) \sin (\xi + 240)$$

Мгновенное значеніе результирующей магнитодвижущей силы трехъ фазъ будетъ

$$m = m_I + m_{II} + m_{III}.$$

Произведя это сложеніе, получимъ [1])

$$m = \frac{3}{2} F' \cos (\omega t - \xi),$$

гдѣ $F' = F_1 = F_2 = F_3$, если токи во всѣхъ фазахъ одинаковы.

Амплитуда результирующей магнитодвижущей силы

$$F = {}^3/_2 \; F' \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (118)$$

[1]) Пользуясь тригонометрической формулой

$$\sin x \sin y = \frac{1}{2} \cos (x - y) - \frac{1}{2} \cos (x + y)$$

По основному закону магнитодвижущая сила одной катушки

$$F' = 0,4\pi I w$$

и

$$F = {}^3/_2 \cdot 0,4\pi I w = 0,6\pi I w \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (119)$$

Въ нашемъ случаѣ, когда группа катушекъ состоитъ изъ нѣсколькихъ частей, уложенныхъ въ отдѣльные каналы, необходимо вставить въ число витковъ коэфф k. Для единства обозначеній введемъ въ формулу число витковъ w_1 одной фазы (ур. 115).

Тогда

$$F = \frac{0,6\pi k I_1 w_1}{p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (120)$$

гдѣ F представляетъ магнитодвижущую силу одной группы катушекъ статора (на пару полюсовъ). Аналогичная формула получится и для ротора.

Если R магнитное сопротивленіе потоку одной пары полюсовъ, то первичная составляющая его $\overline{OA}$ (Фиг. 64) т.-е. первичное фиктивное поле будетъ

$$OA = \frac{0,6\pi k I_1 w_1}{R_1 p}$$

Если R_1 магнитное сопротивленіе общаго первичнаго поля, то его составляющая будетъ

$$\overline{OG} = \frac{0,6\pi k I_1 w_1}{R_1 p}$$

При холостомъ ходѣ, когда вторичнаго тока не существуетъ, т.-е. когда двигатель дѣйствуетъ, какъ реактивная катушка

$$\Phi_1 = \frac{0,6\pi k I_o w_1}{R_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (121)$$

гдѣ Φ_1—дѣйствительно существующее поле, I_o—амплитуда намагничивающаго тока и R_1—сопротивленіе этому потоку.

Такъ какъ Φ_1 извѣстно изъ предыдущей главы, то можно вычислить токъ намагниченія при извѣстномъ R_1. Вычисленіе послѣдняго указано въ слѣдующихъ главахъ.

Для двухфазныхъ двигателей результирующая магнитодвижущая сила находится слѣдующимъ образомъ.

Для одной фазы какъ и раньше имѣемъ

$$m_1 = F' \sin \omega t \sin \xi.$$

Для другой фазы сдвинутой на 90° во времени и въ пространствѣ

$$m_1 = F' \sin (\omega t + 90) \sin (\xi + 90) = F' \cos \omega t \cos \xi$$

Результирующая магнитодвижущая сила

$$m = m_1 + m = F'' (\sin \omega t \ \sin \xi + \cos \omega t \ \cos \xi).$$

Это, по извѣстной тригонометрической формулѣ, даетъ:

$$m = F'' \cos (\omega t - \xi),$$

т.-е. амплитуда результирующей магнитодвижущей силы та же, что и для одной фазы, и поэтому для двухфазнаго двигателя имѣемъ:

$$\Phi_1 = \frac{0,4 \pi k I_0 w_1}{R_1 p} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ (122)$$

36. Коэффиціентъ разсѣянія.

Изъ главъ 17 и 18 извѣстно, что наибольшій коэффиціентъ мощности и круговая діаграмма зависятъ только отъ коэффиціента разсѣянія τ. По уравненію (67) $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2$.

Въ главѣ 16 мы вывели связь τ_1 и τ_2 съ магнитными сопротивленіями, но въ предположеніи, справедливомъ только для обычнаго трансформатора, что магнитодвижущая сила поля разсѣянія и соотвѣтствующаго фиктивнаго поля равны. Въ асинхронныхъ двигателяхъ эти магн.-дв. силы не равны. Правда, онѣ создаются тѣм... же обмотками и токами, но вліяніе этихъ магн.-дв. силъ сказывается различно такъ какъ витки каждой фазы уложены въ нѣсколькихъ каналахъ. Но это различіе можно ввести ни въ магн.-дв. силы, а въ сопротивленія потокамъ. Тогда къ этимъ потокамъ могутъ быть примѣнены теоремы Кирхгофа (уравненія 51 и 52). Фиг. 104 представляетъ общій потокъ полюса, фиг. 106 — потокъ разсѣянія вокругъ канала и притомъ каждый потокъ независимо другъ отъ друга, что необходимо для вычисленія магнитныхъ сопротивленій. Оба эти потока даютъ результирующій потокъ (фиг. 107), которое въ предѣлахъ статора называется первичнымъ Φ_1, въ предѣлахъ ротора—вторичнымъ—Φ_2. Но этотъ результирующій потокъ не имѣетъ никакого значенія для опредѣленія коэффиціентовъ разсѣянія τ или v, такъ какъ и въ выраженіе для v (ур. 57) входитъ не дѣйствительно существующее поле, а его составляющія GO или HO. Въ предыдущей главѣ мы нашли первичное фиктивное поле

$$OA = \frac{0,6 \pi k I_1 w_1}{R p}.$$

Представленное на фиг. 105 поле разсѣянія канала создается проводниками въ немъ лежащими. Такъ какъ мы обозначили черезъ w_1 — число витковъ на фазу, то $\frac{w_1}{p}$ — число

нитковъ на пару полюсовъ и фазу, или число проводниковъ на полюсъ и фазу, то число линій разсѣянія на пару полюсовъ и фазу равно $\frac{0,4\pi I_1 w_1}{R_n p}$, гдѣ R_n — магнитное сопротивленіе линіямъ разсѣянія вокругъ канала. Поле разсѣянія [1]) на пару полюсовъ для трехъ фазъ будетъ

$$\overline{GA} = 3.\frac{0,4\pi I_1 w_1}{R_n p} = \frac{1,2\pi I_1 w_1}{R_n p}$$

отсюда

$$\tau_1 = \frac{\overline{GA}}{\overline{OA}} = \frac{S}{\frac{K}{2} R_n}$$

сравнивъ это уравненіе съ уравненіемъ (55), видимъ, что магнитное сопротивленіе поля разсѣянія каналовъ на пару полюсовъ, отнесенное къ магн.-дв. силѣ $0,4\pi I_1 w_1$, равно половинѣ магнитнаго сопротивленія вокругъ канала, а именно:

$$R_s = \frac{K}{2} R_n \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (123).$$

Такимъ образомъ магнитное сопротивленіе поля разсѣянія каналовъ отнесено къ той же магн.-дв. силѣ, какъ и фиктивное поле. Поэтому къ нему и къ магнитному сопротивленію R общаго поля можно примѣнить законы Кирхгофа. Для двухфазнаго двигателя по главѣ 35

$$OA = \frac{0,4\pi I_1 w_1}{R p},$$

Далѣе, такъ какъ всего имѣется двѣ фазы,

$$GA = 2.\frac{0,4\pi I_1 w_1}{R_n p} = \frac{0,8\pi I_1 w_1}{R_n p}.$$

отсюда

$$\tau_1 = \frac{GA}{OA} = \frac{R}{\frac{K}{2} R_n}.$$

то есть такъ же какъ и въ трехфазномъ двигателѣ

---

[1]) Здѣсь не имѣетъ мѣсто взаимное наложеніе трехъ полей, какъ въ общемъ полѣ Φ_1. Поля разсѣянія каждаго канала и каждой фазы слѣдуетъ считать существующими самостоятельно, а потому въ формулу входитъ число фазъ множителемъ.

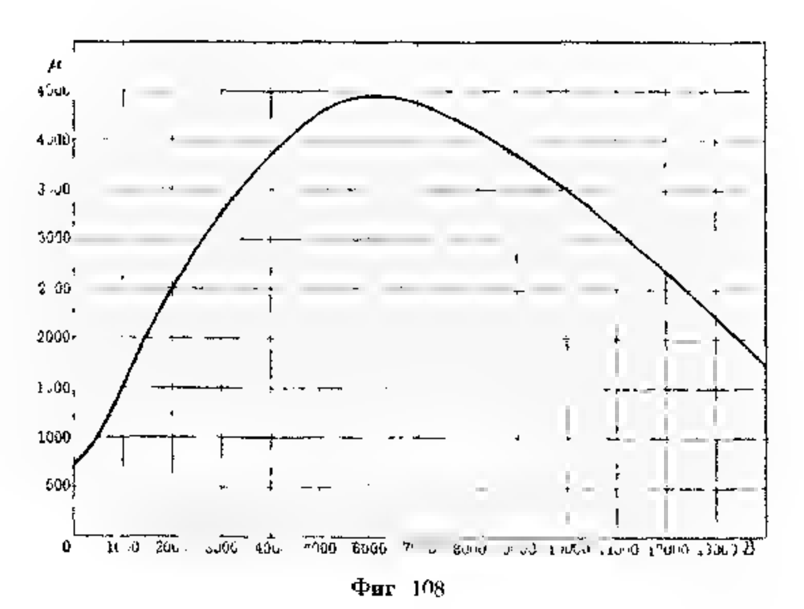
37. Вычисленіе магнитныхъ сопротивленій.

Фиг. 104 даетъ картину общаго потока (одного полюса), охватываемаго группой катушекъ. Соотвѣтственно магнитное сопротивленіе R состоитъ изъ слѣдующихъ послѣдовательно включенныхъ частей:

Магнитное сопротивленіе междужелѣзнаго пространства R_e
„ „ зубцовъ статора R_{z1}
„ „ зубцовъ ротора R_{z2}
„ „ ярма статора R_{k1}
„ „ сердечника ротора R_{k2},

такъ что $R = R_e + R_{z1} + R_{z2} + R_{k1} + R_{k2}$.

Сопротивленіе каждаго участка пути равно соотвѣтствующей длинѣ его l магнитныхъ линій, дѣленной на его сѣченіе S и на магнитную проницаемость матеріала этого участка μ, т. е. равно $\frac{l}{S\mu}$. Магнитную проницаемость получимъ изъ кривой [1]) фиг. 108, соотвѣтственно индукціямъ, вычисленнымъ въ пре-



Фиг 108

дыдущихъ главахъ. Для наглядности составимъ слѣдующую таблицу:

[1]) Эта кривая получена изъ опыта для листового желѣза, примѣняемаго для изготовленія асинхронныхъ двигателей

	Сѣченіе $S=lb$	Индукція B	Проницаемость μ	Магнитное сопротивленіе
Междужел. простр.	98	3070	1	0,00123
Зубцы статора . .	32	9400	3700	0,000037
Зубцы ротора	44	6850	4400	0,000021
Ярмо статора	2.26	5800	4450	0,000091
Сердечникъ ротора .	2.19	7900	4200	0,000063
				0,001442 $=R$.

Отсюда получаются магнитныя сопротивленія отдѣльныхъ частей пути, которыя также внесены въ таблицу.

Слѣдуетъ имѣть въ виду, что магнитныя линіи дважды проходятъ черезъ междужелѣзное пространство, потому что каждая образуетъ замкнутую линію, проходящую черезъ два соотвѣтственныхъ полюса. Такимъ образомъ:

$$R = \frac{2\,\delta}{l\,b} = \frac{2.0,06}{99} = 0,001305.$$

Точно также магнитныя линіи должны два раза пройти черезъ зубцы статора, поэтому [1])

$$R_{z1} = \frac{2.2,2}{32.3700} = 0,000037$$

и для зубцовъ ротора

$$R_{z2} = \frac{2.2,04}{44.4400} = 0,000021.$$

Въ магнитное сопротивленіе ярма статора и сердечника ротора слѣдуетъ подставить среднюю длину пути магнитныхъ линій. Послѣдняя получится вычерчиваніемъ картины распредѣленія магнитныхъ линій, по возможности въ натуральную величину, и ихъ непосредственнымъ измѣреніемъ. Въ нашемъ примѣрѣ имѣемъ для статора приблизительно 21 см., для ротора 10 см.

Это даетъ для статора:

$$R_{k1} = \frac{21}{2.26.4450} = 0,000091.$$

[1]) Высота зубца статора по фиг. 104 равна 2,2 см., а—ротора = 2,04 см.

а для ротора

$$R_r = \frac{10}{2.19.4200} = 0,000063.$$

Сложеніемъ этихъ пяти величинъ, внесенныхъ въ таблицу, получимъ магнитное сопротивленіе общаго поля

$$R = 0,00144.$$

Изъ сравненія отдѣльныхъ величинъ видимъ, что не вполнѣ точныя значенія средней длины пути магнитныхъ линій и приближенность кривой проницаемости μ оказываетъ лишь небольшое вліяніе на величину R. Но очень важно знать точную величину междужелѣзнаго пространства и точно воспроизвести вычисленную величину при изготовленіи двигателя, такъ какъ сопротивленіе междужелѣзнаго пространства составляетъ наибольшую часть сопротивленія всего пути R. По уравненію (123) магнитное сопротивленіе полю разсѣянія вокругъ каналовъ на пару полюсовъ

$$R_s = \frac{k}{2} . R ,$$

гдѣ R_n — сопротивленіе пути вокругъ одного канала (фиг. 105): оно состоитъ изъ сопротивленія желѣза вокругъ канала и сопротивленія зазора между головками сосѣднихъ зубцовъ.

При открытыхъ каналахъ и при закрытыхъ, въ которыхъ мостикъ (между сосѣдними зубцами) тонокъ, первымъ сопротивленіемъ сравнительно съ послѣднимъ можно пренебречь, такъ какъ магнитная проницаемость желѣза при существующихъ индукціяхъ въ нѣсколько тысячъ разъ больше, чѣмъ воздуха. Напротивъ, оно сильно зависитъ отъ размѣровъ з а з о р а. Слѣдуетъ помнить, что при открытыхъ каналахъ магнитныя линіи расширяются, такъ что ширина пучка въ з а з о р ѣ больше толщины края головки зубца α_1 или α_2 (фиг. 105) Очевидно, что магнитныя линіи расширяются тѣмъ больше, чѣмъ больше ширина ϑ з а з о р а. Поэтому для ширины пучка магнитныхъ линій нужно подставить значеніе большее α_1 на величину, зависящую отъ ϑ. По опытнымъ изслѣдованіямъ автора она приблизительно равна $\alpha + \vartheta$. Если l — геометрическая длина желѣза (въ осевомъ направленіи), то магнитное сопротивленіе потоку разсѣянія вокругъ канала

$$R_n = \frac{\vartheta}{(\alpha + \vartheta)\, l} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (124)$$

Отсюда по уравненію (123) магнитное сопротивленіе поля разсѣянія вокругъ каналовъ на пару полюсовъ

$$R_s = \frac{k\, \vartheta}{2\,(\alpha + \vartheta)\, l} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (125)$$

Для двигателей съ закрытыми каналами увеличеніе толщины α мостика G на величину ϑ имѣетъ малое значеніе (фиг. 109). Сопротивленіе мостика вычисляютъ (по форм. 122), задавшись въ первомъ приближеніи такой индукціей B въ немъ, для которой $\mu = 1000$. Для найденной величины B можемъ теперь найти болѣе точное значеніе μ по фиг. 108 и вставить въ уравненіе

$$R_n = \frac{\vartheta}{\mu \alpha l} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (126)$$

θ

Фиг. 109

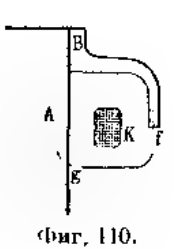
Для нашего примѣра размѣры зазора между зубцами даны на фиг. 106. Отсюда имѣемъ для статора (по уравненію 125)

$$R_{s_1} = \frac{0,958 \cdot 0,3}{2\,(0,05 + 0,3)\,8,2} = 0,0503.$$

Такъ какъ размѣры зазора въ роторѣ тѣ же, то

$$R_{s_2} = 0,0503.$$

Кромѣ разсѣянія вокругъ каналовъ существуетъ еще разсѣяніе вокругъ головокъ катушекъ на обѣихъ лобовыхъ поверхностяхъ двигателя. Магнитныя линіи, охватывающія здѣсь катушки, создаются той же магн.-дв. силой, которою создаются и фиктивныя поля. На фиг. 110-ой показанъ разрѣзъ по головкѣ катушки K; линія A ограничиваетъ желѣзный сердечникъ статора, а B даетъ разрѣзъ по подшипниковой крышкѣ. Тонкая замкнутая линія показываетъ средній путь магнитныхъ линій разсѣянія вокругъ головки катушки. При опредѣленіи сопротивленія этого пути R_k слѣдуетъ принимать во вниманіе лишь сопротивленіе участка fg въ воздухѣ между крышкой и желѣзнымъ сердечникомъ. Размѣры этого пути могутъ быть опредѣляемы изъ размѣровъ двигателя. Для нашего примѣра сопротивленіе это для обоихъ лобовыхъ частей приблизительно равно [1])



Фиг. 110.

$$R_k = \frac{10}{2.15} = 0,33$$

[1]) Это разсѣяніе головокъ катушекъ, которое раньше считалось незначительнымъ, теперь часто переоцѣнивается. Есть авторы, которые считаютъ его одного порядка съ разсѣяніемъ около каналовъ. Нетрудно понять, что это не такъ. Дѣло въ томъ, что путь силовыхъ линій канала составляется изъ воздушнаго зазора въ нѣсколько миллиметровъ, въ то время какъ путь черезъ воздухъ около головокъ кату-

а для ротора, гдѣ подшипниковыя крышки не входятъ въ цѣпь потока разсѣянія около головокъ катушекъ обмотки ротора

$$R_{k2} = \frac{20}{2.15} = 0,66$$

Такъ какъ потоки разсѣянія около каналовъ и около головокъ катушекъ по отношенію къ обмоткѣ включены параллельно, то общее магнитное сопротивленіе первичнаго потока разсѣянія будетъ

$$R_1' = \frac{R_{s1} \cdot R_{k1}}{R_{s1} + R_{k1}} = \frac{0,0503 \cdot 0,33}{0,0503 + 0,33} = 0,0437.$$

а сопротивленіе для вторичнаго потока разсѣянія

$$R_2' = \frac{R_{s2} \cdot R_{k2}}{R_{s2} + R_{k2}} = \frac{0,0503 \cdot 0,66}{0,0503 + 0,66} = 0,047.$$

Если сравнить эти величины съ тѣми же сопротивленіями вокругъ каналовъ, то увидимъ, что вліяніе путей вокругъ головокъ катушекъ на общее разсѣяніе не велико, такъ что можно довольствоваться приблизительнымъ расчетомъ R_k.

Изъ этихъ равенствъ получимъ:

$$\tau_1 = \frac{R}{R_1'} = \frac{0,00144}{0,0437} = 0,033$$

$$\tau_2 = \frac{R}{R_2'} = \frac{0,00144}{0,047} = 0,0306$$

и по уравненію (67)

$$\tau = 0,0637.$$

38. Наибольшій коэффиціентъ мощности; намагничивающій токъ.

Теперь можно по уравненію (77) опредѣлить наибольшій коэффиціентъ мощности

$$(\cos\varphi)_{max} = \frac{1}{1 + 2 \cdot 0,0637} = 0,89.$$

Измѣренныя для того же двигателя значенія этихъ величинъ суть $\tau = 0,0495$ и $(\cos\varphi)_{max} = 0,91$ (см. фиг. 21 и 22).

щекъ составляетъ нѣсколько сантиметровъ. Къ тому же около каждаго канала дѣйствуетъ полная магн.-дв. сила пучка стержней въ каналѣ, т.-е. въ общемъ въ три раза большая, чѣмъ для одной фазы, между тѣмъ какъ для взаимно сцѣпляющихся головокъ катушекъ дѣйствуетъ въ общемъ лишь ½ магн.-дв. силы одной фазы, какъ при общемъ полѣ (соотвѣтственно уравненію 119)

Видимъ, что вычисленныя здѣсь значенія для τ и $(\cos\varphi)_{max}$ хорошо согласуются съ дѣйствительными, тѣмъ болѣе если принять во вниманіе, что, во-первыхъ, вычисленіе производилось безъ помощи опытныхъ коэффиціентовъ, и, во вторыхъ, что даже при самомъ точномъ изготовленіи двигателей одного и того же типа значенія для τ расходятся въ отдѣльныхъ двигателяхъ до 15%. Такое различіе въ значеніяхъ для τ мало вліяетъ на коэффиціентъ мощности, такъ какъ наибольшій коэффиціентъ мощности зависитъ отъ $1+2\tau$, а τ никогда не бываетъ больше 0,08.

По формулѣ (121) получаемъ амплитуду намагничивающаго тока для трехфазнаго двигателя

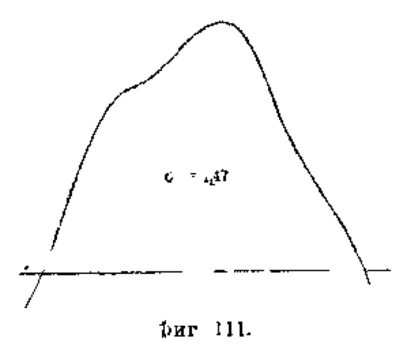
$$I_0 = \frac{p.R_1\Phi_1}{0{,}6\,\pi\,k\,w_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (127)$$

Раздѣливъ это выраженіе на коэффиціентъ формы кривой, получимъ дѣйствующее значеніе

$$\mathfrak{J}_0 = \frac{p.R_1\Phi_1}{0{,}6\,\pi\,k\,\mathfrak{k}\,w_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (128)$$

Для двухфазнаго двигателя въ эту формулу вводятъ вмѣсто 0,6 коэффиціентъ 0,4 (по уравненію 122).

Въ общемъ кривая тока зависитъ отъ кривой приложеннаго напряженія. Для синусоидальной формы кривой, принимаемой обычно для расчета, фиг. 111 показываетъ форму кривой тока холостого хода, снятую для двигателя нашего примѣра. Коэффиціентъ формы кривой $\mathfrak{k} = 1{,}47$.



Фиг. 111.

Кривая тока холостого хода всѣхъ нормальныхъ двигателей имѣетъ приблизительно форму кривой фиг. 111 и при синусоидальномъ приложенномъ напряженіи. Для большихъ двигателей, гдѣ междужелѣзное пространство больше, кривая будетъ болѣе пологой, такъ какъ кривая тока реактивной катушки тѣмъ ближе къ кривой напряженія, чѣмъ больше магнитное сопротивленіе путей въ воздухѣ сравнительно съ путями въ желѣзѣ. Поэтому, если форма кривой тока точно неизвѣстна, то можно принять *) коэффиціентъ формы кривой

$$\mathfrak{k} = 1{,}45.$$

*) Обычно для коэфф. формы кривой берутъ 1,414 (какъ для синусоиды), какъ при вычисленіи потока по напряженію такъ и для вычисленія намагничивающаго тока. Но если кривая напряженія синусоида, то кривая тока уже не можетъ быть синусоидой и наоборотъ.

Такъ какъ въ главѣ 36 для потока разсѣянія вокругъ каналовъ была принята та же магн.-дв. сила, что и для общаго потока, то формула (51) пригодна и

$$R_1 = \frac{RR'_1}{RR'_1} = \frac{0{,}00144 \, . \, 0{,}0437}{0{,}00144 + 0{,}0437} = 0{,}0014,$$

откуда

$$\mathfrak{J}_0 = \frac{2 \, . \, 0{,}0014 \, . \, 301000}{0{,}6 \, . \, 3{,}14 \, . \, 0{,}958 \, . \, 1{,}47 \, . \, 104} = 3{,}06 \text{ амп.}$$

Изъ опыта же имѣемъ $\mathfrak{J}_0 = 3{,}1$ ампера.

39. Вліяніе междужелѣзнаго пространства, зазора между зубцами и число полюсовъ на свойства двигателя.

Чтобы найти отъ какихъ величинъ главнымъ образомъ зависитъ τ_1 и τ_2, выберемъ изъ путей для общаго потока и для потоковъ разсѣянія только тѣ участки, отъ сопротивленій которыхъ зависятъ главнымъ образомъ сопротивленія этимъ потокамъ. Таковыми являются магнитныя сопротивленія R_e междужелѣзнаго пространства и R_s зазоровъ между зубцами. Поэтому имѣемъ приблизительно

$$\tau_1 = \frac{R_e}{R_{s1}}, \qquad \tau_2 = \frac{R_e}{R_{s2}}.$$

Отъ тѣхъ же величинъ долженъ зависѣть и общій коэффиціентъ разсѣянія τ, поэтому возьмемъ приближенно для двигателей съ открытыми каналами (считая коэффиціентъ обмотки k мало отличающимся отъ единицы)

$$\tau = C' \frac{R_e}{R_s} = C' \frac{\frac{2\delta}{lb}}{\frac{\vartheta}{2(\alpha+\vartheta)l}} = C'' \frac{\delta(\alpha+\vartheta)}{b\vartheta} \quad \ldots (129)$$

Для закрытыхъ каналовъ, по уравненію (126),

$$\tau = C \frac{\delta \mu \alpha}{l \vartheta} \quad \ldots \ldots (130)$$

Изъ этой формулы слѣдуетъ, что общее разсѣяніе прямо пропорціонально величинѣ междужелѣзнаго пространства δ и обратно пропорціонально длинѣ полюса l. Если, напр., одинъ двигатель съ 72 каналами на статорѣ обмотанъ одинъ разъ на

шесть полюсовъ съ 4 каналами на полюсъ и фазу, а другой разъ на восемь полюсовъ съ тремя каналами на полюсъ и фазу, то въ последнемъ случаѣ разсѣяніе больше въ [illegible] раза, а коэффиціентъ мощности соотвѣтственно меньше.

Эта же формула даетъ отвѣтъ на вопросъ, какъ измѣнится коэффиціентъ разсѣянія, если междужелѣзное пространство двигателя увеличить расточивъ статоръ или обточивъ роторъ. При этомъ увеличивается δ и одновременно уменьшается α. Отсюда слѣдуетъ, что заранѣе нельзя сказать, увеличится ли или уменьшится разсѣяніе. Въ двигателяхъ съ высокими головками зубцовъ (α значительно больше δ) или съ совсѣмъ открытыми прямоугольными каналами при расточкѣ увеличеніе δ оказываетъ большее вліяніе, такъ что разсѣяніе увеличивается. Въ двигателяхъ съ узкими зазорами между зубцами и съ закрытыми каналами большее вліяніе оказываетъ уменьшеніе α, такъ что разсѣяніе уменьшается. Съ увеличеніемъ δ всегда связано увеличеніе намагничивающаго тока, такъ какъ онъ зависитъ главнымъ образомъ отъ δ и очень мало отъ α.

Формулами (129) или (130) очень удобно пользоваться при пересчетѣ двигателя даннаго типа на различныя мощности, опредѣливъ предварительно коэффиціентъ C опытнымъ путемъ для одного двигателя. Напротивъ эта формула непримѣнима для расчета двигателей различныхъ типовъ, такъ какъ въ ней приняты во вниманіе только магнитное сопротивленіе междужелѣзнаго пространства и зазора между зубцами. Болѣе точные результаты получаются, если вмѣсто пользованія какой-либо формулой опредѣлить магнитныя сопротивленія способами, указанными выше.

40. Потери въ мѣди и потери холостого хода; построеніе круговой діаграммы по вычисленнымъ даннымъ двигателя.

Имѣя вычисленныя по предыдущимъ главамъ величины τ и ∂_0, можемъ построить круговую діаграмму, такъ какъ по главѣ 18

$$OS = \partial_0 \quad \text{и} \quad ST = \frac{\partial_0}{\tau}$$

Для построенія круга вращающихъ моментовъ необходимо знать потери въ мѣди статора, а для этого сопротивленіе r_1 одной фазы обмотки статора. Вычисленіе ихъ не представляетъ затрудненія. Слѣдуетъ лишь нарисовать головки катушекъ или соединительныхъ вилокъ такъ, какъ это соотвѣтствуетъ дѣйствительному выполненію. Измѣреніемъ получимъ длину проволоки одной фазы. Если длина ея выражена въ метрахъ, а сѣченіе въ кв. мм., то удѣльное сопротивленіе берется равнымъ

0,02, что соотвѣтствуетъ температурѣ въ 70° C, такъ какъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія вычисляется для продолжительной работы. Первичная сила тока измѣряется по построенной діаграммѣ (фиг. 72), и вычисляется величина $3 r_1 \mathfrak{J}_1^2$. Раздѣливъ эти потери на тройное фазное напряженіе, получимъ ваттную составляющую тока, которую отложимъ отрѣзкомъ AH. Проведя черезъ H параллель основной линіи до пересѣченія съ AT, получимъ точку G, принадлежащую кругу моментовъ (см. гл. 19).

Для построенія круга мощностей нужно знать потери въ мѣди ротора. Вычисленіе сопротивленія ротора производится опять по эскизу обмотки [1]). Вторичная сила тока представлена на діаграммѣ отрѣзкомъ SA (фиг. 72), но масштабъ ея другой, чѣмъ первичной силы тока. Масштабъ получается изъ условія, что при всякой большой нагрузкѣ первичные и вторичные амперъвитки приблизительно равны между собой:

$$\mathfrak{J}_1 w_1 = \mathfrak{J}_2 w_2 ,$$

откуда

$$\mathfrak{J}_2 = \frac{\mathfrak{J}_1 w_1}{w_2} .$$

Такъ какъ масштабъ $\mathfrak{J}_1$, изображенный векторомъ OA, согласно предыдущему извѣстенъ, то отсюда получается масштабъ для тока $\mathfrak{J}_2$, изображеннаго векторомъ SA. Вычисляя теперь $3 r_2 \mathfrak{J}_2^2$, получимъ точку N круга мощностей тѣмъ же путемъ, какъ и кругъ вращающихъ моментовъ.

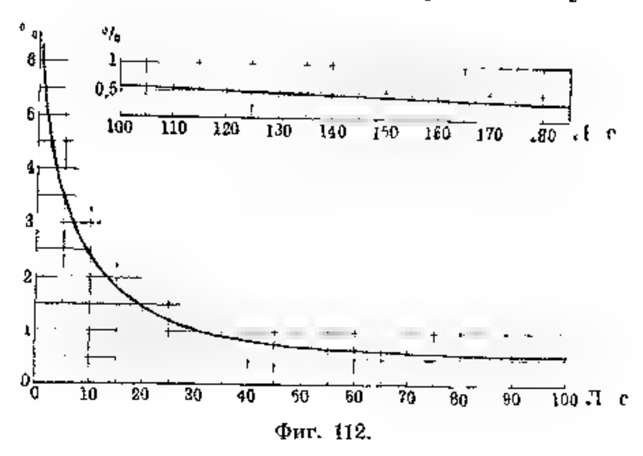
Для непосредственнаго опредѣленія изъ діаграммы вращающаго момента и полезной мощности необходимо еще нанести линію потерь холостого хода. Эти постоянныя потери состоятъ изъ потерь на треніе и потерь въ желѣзѣ. Потери на треніе не могутъ быть вычислены, а должны быть взяты согласно опытамъ надъ ранѣе выполненными двигателями. При этомъ можно пользоватся кривой фиг. 112, представляющей зависимость потерь на треніе (въ процентахъ отъ нормальной мощности) въ двигателяхъ съ обыкновенными подшипниками. Для двигателей съ шариковыми подшипниками эти величины, конечно, будутъ меньше. Потери въ желѣзѣ можно опредѣлить или по формулѣ

$$(\gamma_1 c B^{1,6} + \beta c^2 B^2) 10^{-4} \text{ ваттъ на куб. дециметръ,}$$

или по кривымъ фиг. 113, построеннымъ для среднихъ значеній γ_1 и β, гдѣ γ_1 — коэффиціентъ потерь на гистерезисъ, а β — на токи Фуко. Основываясь на сказанномъ на стр. 103 можно

[1]) Относительно вычисленія сопротивленія обмотокъ короткозамкнутыхъ роторовъ см. гл. 41

произвести вычисленіе потерь въ желѣзѣ ротора, въ предположеніи, что потокъ въ немъ имѣетъ ту же частоту что и по-



Фиг. 112.

B

20-Періодовъ

Ватты на куб. дцм.

Фиг. 113.

токъ статора. Удобно представить эти данныя въ видѣ таблицы, въ которой индукціи взяты изъ таблицы на страницѣ 121. Объемы вычислены по размѣрамъ фиг. 104.

	B	Объемъ въ дцм³	Потери въ желѣзѣ.	
			на 1 дцм³	общiя
Зубцы статора. . .	9400	0,35	32	11,2
Зубцы ротора . . .	6850	0,39	19	7,4
Ярмо статора . . .	5800	2,22	14	31
Сердечникъ ротора	7900	0,76	23	17,5
				въ суммѣ 67 ваттъ.

Случайно потери въ желѣзѣ, вычисленныя по выше приведенной формулѣ, справедливой для трансформатора, совпали съ непосредственно измѣренными (стр. 105).

Обычно онѣ меньше послѣднихъ. Вычисленныя потери также меньше, чѣмъ потери, измѣренныя при неподвижномъ разомкнутомъ роторѣ (въ нашемъ двигателѣ 76 ваттъ), хотя въ данномъ случаѣ двигатель вполнѣ соотвѣтствуетъ ненагруженному трансформатору, и появляющiяся при вращенiи ротора измѣненiя индукцiи въ зубцахъ большой частоты здѣсь не имѣютъ мѣста. Это объясняется тѣмъ, что благодаря заусеницамъ листовъ, появляющимся при обточкѣ ротора и статора, потери на гистерезисъ въ зубцахъ увеличиваются [1]. Кромѣ того увеличенiе потерь на гистерезисъ происходитъ еще отъ старѣнiя желѣза краевъ зубцовъ отъ значительныхъ нагрѣванiй при продолжительной работѣ двигателя. Поэтому слѣдуетъ потери въ желѣзѣ, вычисленныя по формулѣ увеличивать на 10 — 15%.

Прибавивъ потери на тренiе, взятыя изъ фиг. 112, и раздѣливъ общiя потери холостого хода на тройное фазное напряженiе, получимъ ваттную составляющую тока холостого хода, который нанесенъ на дiаграмму въ видѣ отрѣзка JA_0. Отъ прямой, проведенной черезъ точку A_0 параллельно основной линiи, необходимо отсчитывать вращающiй моментъ GQ' и мощность $L'N$, согласно главѣ 19.

Всѣ остальныя характерныя для двигателя величины находятся также изъ полученной такимъ образомъ полной круговой дiаграммы.

[1]) Увеличенiе потерь на гистерезисъ, вслѣдствiе обработки листовъ, установлено авторомъ опытнымъ путемъ, причемъ онъ произвелъ измѣренiя съ пакетомъ листовъ до и послѣ разрѣзанiя его на узкiя полосы.

41. Потери въ обмоткѣ короткозамкнутаго ротора

Въ короткозамкнутой обмоткѣ бѣличьемъ колесѣ токи въ различныхъ стержняхъ неодинаковы и распредѣлены такъ, какъ показано на фиг. 24 соотвѣтственной толщиной линій. Вычисленіе потерь въ такой обмоткѣ было бы чрезвычайно сложно, если бы не удалось найти математическаго выраженія, аналогичнаго закону Джауля для обычныхъ обмотокъ. Для вычисленія на практикѣ лучше всего подходятъ формулы Punga.

Общія тепловыя потери въ такой обмоткѣ суть

$$V = \mathfrak{J}_q^2 R_q \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (131)$$

гдѣ $\mathfrak{J}_q$—сила тока, эквивалентная вторичному току, а R_q—сопротивленіе, эквивалентное сопротивленію обычной обмотки; при этомъ

$$R_q = r_r + (2\pi p)^2 r_s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (132)$$

гдѣ r_r сопротивленіе колецъ, замыкающихъ на короткое стержни обмотки, если они разрѣзаны и включены послѣдовательно. Такимъ образомъ

$$r_r = 2\frac{0{,}02\, l_r}{S_r} = \frac{0{,}04\, l_r}{S_r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (133)$$

гдѣ l_r обозначаетъ длину кольца въ метрахъ, а S_r—поперечное сѣченіе въ кв. мм; 0,02 —удѣльное сопротивленіе мѣди при 70°C, r_s—сопротивленіе всѣхъ стержней при параллельномъ включеніи, т.-е.

$$r_s = \frac{0{,}02\, l_s}{N_2 S_s} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (134)$$

l_s—длина, S_s поперечное сѣченіе одного стержня, а N_2—общее число стержней ротора.

Отсюда (по ур. 131 и 132) тепловыя потери въ двухъ кольцахъ будутъ $\mathfrak{J}_q^2 r_r$ и въ стержняхъ $\mathfrak{J}_q^2 (2\pi p)^2 r_s$.

Эквивалентная сила тока будетъ

$$\mathfrak{J}_q = \frac{N_2 \mathfrak{J}_2}{2\pi p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (135)$$

гдѣ $\mathfrak{J}_2$—токъ въ одномъ стержнѣ. Послѣдній находится изъ закона равенства первичныхъ и вторичныхъ ампервитковъ при значительной нагрузкѣ. Такъ какъ въ этой обмоткѣ витковъ не существуетъ, то получимъ, что законъ формулируется такъ: произведеніе силы тока на число стержней въ статорѣ

и роторѣ одно и то же. Обозначивъ число стержней статора черезъ N_1, получимъ

$$N_2 \mathfrak{J}_2 = N_1 \mathfrak{J}_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (136)$$

Отсюда

$$\mathfrak{J}_q = \frac{N_1 \mathfrak{J}_1}{2\pi p} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (137)$$

Съ помощью этихъ формулъ легко расчитать обмотку—бѣличье колесо. Рѣшимъ теперь вопросъ, какіе размѣры необходимо придать стержнямъ и кольцамъ ротора для бѣличьяго колеса, для замѣны имъ ротора нашего примѣра, при чемъ мощность, коэфф. мощности и коэфф. полезнаго дѣйствія должны остаться тѣми же. По стр. 105 тепловыя потери въ роторѣ нашего двухсильнаго двигателя равны 99 ваттамъ при полной нагрузкѣ. Поэтому мы должны положить

$$\mathfrak{J}_q^2 r_q = 99$$

По даннымъ стр. 112 $N_1 = 13 \cdot 48 = 624$ и по фиг. 20 для полезной мощности въ 2 лош. силы $\mathfrak{J}_1 = 10$.

Отсюда

$$\mathfrak{J}_q = \frac{99}{497^2} = \frac{99}{247000} = 0{,}0004.$$

Относительно размѣровъ стержней и замыкающихъ колецъ мы имѣемъ свободный выборъ постольку, поскольку мы можемъ распредѣлить между ними общія потери. Допустивъ распредѣленіе потерь поровну между стержнями и кольцами, имѣемъ

$$r_r = (2\pi p)^2 r_s = \frac{R_q}{2} = 0{,}0002$$

Принявъ средній діаметръ кольца равнымъ 175 мм., соотвѣтственно наружному діаметру ротора, равному 193,8 мм., получимъ среднюю длину кольца

$$l_r = 0{,}55 \text{ метра.}$$

Сѣченіе же кольца, по равенству (133)

$$S_r = \frac{0{,}04 \cdot 0{,}55}{0{,}0002} = 110 \text{ кв. мм.}$$

Далѣе имѣемъ

$$R_s = \frac{0{,}0002}{(2\pi 2)^2} = \frac{0{,}0002}{158} = 1{,}27 \cdot 10^{-6}.$$

Роторъ съ кольцами нашего двигателя имѣлъ 60 каналовъ. Для ротора же въ формѣ бѣличьяго колеса мы дѣлаемъ въ цѣляхъ облегченія пуска въ ходъ (гл. 10) 61 каналъ. Возьмемъ длину стержня между серединами колецъ равной 0,1 метра, соотвѣтственно длинѣ сердечника ротора въ 8,2 см. Тогда по ур. (134) сѣченіе стержня будетъ

$$S_s = \frac{0{,}02 \cdot 0{,}1}{61 \cdot 1{,}27} \cdot 10^6 = 26 \text{ кв. мм.}$$

При круглыхъ стержняхъ діаметръ равенъ 5,8 мм.

42. Приближенное вычисленніе коэффиціентовъ мощности и полезнаго дѣйствія.

Иногда бываетъ необходимымъ, хотя бы только приближенно, но быстро вычислить для опредѣленной силы тока двигателя $\mathfrak{J}_1$, коэффиціентъ мощности и коэффиціентъ полезнаго дѣйствія. Это возможно сдѣлать, не вычисляя коэффиціента разсѣянія и не строя круговой діаграммы, слѣдующимъ образомъ. Сперва вычисляютъ токъ намагниченія $\mathfrak{J}_m$ по ур. (129). При этомъ вмѣсто сопротивленія R_1 первичному магнитному потоку достаточно подставить сопротивленіе R общему потоку, такъ какъ они мало отличаются другъ отъ друга и такимъ образомъ вычислять сопротивленіе первичному потоку разсѣянія R_1 нѣтъ необходимости. Принимая, что токъ намагниченія совпадаетъ съ безваттной составляющей тока $\mathfrak{J}_1$, какъ въ реактивной катушкѣ, получимъ, что ваттная составляющая послѣдняго равна $\sqrt{\mathfrak{J}_1^2 - \mathfrak{J}_0^2}$ Ошибка, которая получается при этомъ, видна изъ фиг. 77 и состоитъ въ томъ, что въ прямоугольномъ треугольникѣ AOR вмѣсто катета OR мы беремъ отрѣзокъ OS. Умноживъ полученную величину ваттной составляющей тока на тройное (или двойное) фазное напряженіе, получимъ потребляемую двигателемъ мощность при токѣ $\mathfrak{J}_1$. Отношеніе этой мощности къ вольтъ-амперамъ ($3\,\mathfrak{J}_1 P_1$ или $2\,\mathfrak{J}_1 P_1$) даетъ коеффиціентъ мощности съ тою же точностью, съ какой получена потребляемая мощность. Для полученія мощности двигателя необходимо изъ потребляемой двигателемъ мощности вычесть общія потери въ немъ. Потери въ мѣди и желѣзѣ можно вычислить способами, указанными въ 40 главѣ, а потери на треніе можно взять изъ кривой фиг. 112, если нѣтъ возможности непосредственно измѣрить общія потери холостого хода. Отношеніе отдаваемой мощности къ потребляемой даетъ коэффиціентъ полезнаго дѣйствія.

Еще проще опредѣлить приближенно мощность, коэффиціентъ мощности и коэффиціентъ полезнаго дѣйствія двигателя, если возможно измѣрить потребляемую двигателемъ мощность при данной нагрузкѣ и при холостомъ ходѣ, а также токъ холостого хода. Послѣдній приблизительно равенъ току намагниченія $\mathfrak{J}_m$, такъ что послѣдняго нѣтъ необходимости вычислять.

43. Опредѣленіе размѣровъ проектируемаго двигателя.

Хотя рѣдко кому приходится проектировать заново двигатель, не пользуясь совершенно данными о существующихъ двигателяхъ, но ради полноты приведемъ ходъ такого разсчета.

Понятно, что при началѣ расчета необходимо имѣть какойлибо исходный пунктъ. Если же таковаго не имѣется, то приходится задаваться на удачу какимъ-либо основнымъ размѣромъ, но тогда самый расчетъ можетъ слишкомъ затянуться. Удобнѣе въ такомъ случаѣ задаться однимъ изъ размѣровъ полюсной поверхности или потокомъ на пару полюсовъ. Укажемъ здѣсь на формулу Зенгеля, какъ на одну изъ удобныхъ исходныхъ формулъ; она даетъ потокъ на пару полюсовъ

$$\Phi_1 = 3.10^5 \sqrt{\frac{PS \,.\, n_1}{c_1}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; (138)$$

гдѣ PS — нормальная мощность, n_1 — синхронное число оборотовъ въ минуту и c_1 — число періодовъ тока въ секунду. Далѣе по числу періодовъ и числу оборотовъ получимъ число полюсовъ, причемъ число полюсовъ, конечно, должно быть четное. Исходя изъ допускаемой индукціи въ междужелѣзномъ пространствѣ и изъ опредѣленнаго по формулѣ (138) потока Φ_1, получимъ величину полюсной поверхности. По потоку и напряженію, для котораго предназначенъ двигатель, найдемъ число витковъ w_1. По нормальной мощности, коэффиціенту мощности и коэффиціенту полезнаго дѣйствія получается первичная сила тока. По послѣднему и допускаемой плотности тока въ первичной обмоткѣ, получимъ сѣченіе проволоки обмотки. Принимая же во вниманіе число витковъ и изоляцію, получимъ размѣры каналовъ. По величинѣ индукціи, допускаемой въ зависимости отъ потерь, получимъ сѣченія зубцовъ. Такъ какъ величина полюсной поверхности опредѣлена раньше, то отсюда получается длина двигателя въ осевомъ направленіи. По величинѣ индукціи, допускаемой въ ярмѣ, получимъ его сѣченіе.

Послѣ такого приближеннаго вычисленія главныхъ размѣровъ, необходимо найти длины проволокъ и потери въ мѣди при нормальной нагрузкѣ. Сила тока въ роторѣ найдется изъ равенства первичныхъ и вторичныхъ ампервитковъ. Скольженіе

при нормальной нагрузкѣ опредѣлится по потерямъ въ мѣди ротора V по уравн. (11).

Если послѣ приближеннаго вычисленія потерь въ желѣзѣ и мѣди и взятыхъ изъ фиг. 112 потерь на треніе не получится желаемаго коэффиціента полезнаго дѣйствія, то полученные размѣры нужно измѣнить соотвѣтствующимъ образомъ и снова произвести вычисленіе.

По величинѣ наибольшаго желаемаго коэффиціента мощности получимъ коэффиціентъ разсѣянія и затѣмъ по току холостого хода, который желають допустить,—магнитное сопротивленіе общему потоку и потоку разсѣянія. По послѣднимъ опредѣлится междужелѣзное пространство и размѣры зазора между краями зубцовъ.

Какъ видно изъ приведеннаго хода расчета, проэктирующій можетъ достигнуть желаемой цѣли весьма различными способами, конечно въ границахъ заданія. Отъ его умѣнья и опытности зависитъ достиженіе цѣли при наилучшихъ коэффиціентѣ мощности, коэффиціентѣ полезнаго дѣйствія, способности къ перегрузкѣ, начальномъ вращающемъ моментѣ, наименьшемъ нагрѣваніи и относительно маломъ вѣсѣ двигателя.

Основныя формулы.

Формула	Стр.
$n = \frac{c_1}{p}$	9
$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$	11
$s' = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2} = \frac{n_2 - n_1}{n_2}$	86
$s = \frac{s'}{s' - 1}$	87
$n_2 = n_1 \ (1 - s)$	11
$c_2 = c_1 \cdot s.$	12
$\omega_1 = \frac{2\pi c_1}{p}$	14
$W_2 = \omega_2 \cdot M.$	13
$W_1 = \omega_1 \cdot M.$	13
$W_2 = \frac{2\pi \cdot c_1}{p} \ (1 - s) \ M.$	28
$V = (W_1 - W_2) = (\omega_1 - \omega_2) M$	13
$V = s \cdot W_1$	13
$V = \frac{s}{1 - s} \ W_2.$	13
$V = m \cdot r_2 \cdot \mathfrak{J}_2^2$	14
$M = \frac{p \cdot V}{2\pi \cdot c_1 \cdot s}$	14
$M = \frac{1}{736} \cdot \frac{p \cdot V}{2\pi \cdot c_1 \cdot s}$ лош. с.	14
$M = 0{,}0162 \frac{p \cdot V}{c_1 \cdot s}$ клг.-мтр.	14
$M = 0{,}0162 \frac{p V}{c_1}$ клг.-мтр.	15
$M = \pi \cdot m \cdot p \cdot w_2^2 \, \Phi^2 \, \frac{r_2 \cdot c_1 \cdot s}{r_2^2 + s^2 (2\pi \cdot c_1 L_2')^2}$	16

Стр.

$M = \frac{m \cdot p \cdot w_2^2 E_1^2}{2\pi \cdot w_1^2 \cdot \gamma^2} \cdot \frac{r_2 \cdot s}{c_1 [r_2^2 + s^2 (2\pi c_1 L_2')^2]}$ . . . 17

$M_{max.} = \frac{m \cdot p \cdot w_2^2 \cdot E_1^2}{8\pi^2 \cdot w_1^2 \cdot \gamma^2 \cdot c_1^2 \cdot L_2'}$ 18

$s = \frac{r_2}{2\pi \cdot c_1 \cdot L_2'}$

$\frac{2\pi \cdot c_2 \cdot L_2'}{r_2} = 1$

Условія для наибольшаго вращающаго момента 17

$M_a = \frac{p}{2\pi \cdot c_1} \cdot m r_2 \mathfrak{J}_2^2$ 22

$M_a = \frac{m \cdot p \cdot r_2}{2\pi \cdot c_1} \cdot \frac{w_1^2}{w_2^2} \mathfrak{J}_1^2$ 22

$M_a = \frac{m \cdot p \cdot w_2^2 E_1^2}{2\pi \cdot w_1^2 \cdot \gamma^2} \cdot \frac{r_2}{c_1 [r_2^2 + (2\pi \cdot c_1 L_2')^2]}$ . . . 23

$\tau_1 = \frac{R}{R_1'}$

$\tau_2 = \frac{R}{R_2'}$

$v_1 = \frac{R}{R_1}$

$v_2 = \frac{R}{R_2}$ 55

$v = 1 + \tau_1$ 55

$v_2 = 1 + \tau_2$ 56

$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2$

$v_1 \cdot v_2 = 1 + \tau$ 57

$\sigma = 1 - \frac{1}{v_1 \cdot v_2}$ 56

$(\cos \varphi_1)_{max} = \frac{1}{1 + 2\tau}$ 63

$W = \mathfrak{J}_2 \cdot E_2 \cos \alpha + \mathfrak{J}_3 E_3 \cos \varphi$ (мощность трехфазнаго тока) . 96

$\Phi_1 = \frac{E_1 \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot c \cdot k \cdot w_1}$ Потокъ и эл.-дв. сила трехфазнаго двигателя 112

$\mathfrak{J}_0 = \frac{p \cdot R_1 \cdot \Phi_1}{0{,}6\pi \cdot k \cdot \delta \cdot w_1}$ Токъ намагниченія трехфазнаго двигателя 125

$\mathfrak{J}_0 = \frac{p R_1 \cdot \Phi_1}{0{,}4 \cdot \pi \cdot k \cdot \delta \cdot w_1}$ Токъ намагниченія двухфазнаго двигателя 125

Главнѣйшія обозначенія.

Здѣсь указаны страницы, гдѣ дано опредѣленіе данной величины, или гдѣ она встрѣчается впервые.

		стр.
ω_1	— угловая скорость вращающагося поля	11, 14
ω_2	— угловая скорость ротора	11
α	— толщина края головки зубца или толщина мостика между зубцами	113
B	— магнитная индукція	2
l	— длина желѣзнаго сердечника статора (и ротора) въ осевомъ направленіи	112
β	— коэффиціентъ для потерь отъ токовъ Фуко	128
M	— вращающій моментъ	12
M_a	— начальный вращающій моментъ	14
δ	— длина междужелѣзнаго пространства	113
ϑ	— ширина зазора между головками зубцовъ	113
e	— электродвижущая сила, мгновенное значеніе	1
$\mathfrak{E}$	— „ „ дѣйствующее „	1
E	— „ „ амплитуда „	1
$\mathfrak{E}_2$	— вторичная эл.-дв. сила, индуктируемая всѣмъ вторичнымъ потокомъ	16, 20
$\mathfrak{E}_{2i}$	— вторичная эл.-дв. сила, индуктируемая общимъ потокомъ	18
σ	— коэффиціентъ разсѣянія по Behn-Eschenburg'у	57
η	— коэффиціентъ полезнаго дѣйствія	29
η	— коэффиціентъ гистерезиса (Штейнметца)	128
M	— магнитодвижущая сила, амплитуда	116
G	— потери въ желѣзѣ	29
b	— дѣйствующая ширина желѣза полюса по окружности	112
H	— потери мѣди статора	29
i	— сила тока, мгновенное значеніе	1
$\mathfrak{J}$	— сила тока, дѣйствующее значеніе	1
I	— сила тока, амплитуда	1
$\mathfrak{J}_0$, I_0	— токъ намагниченія	62, 117
k	— коэффиціентъ обмотки (трехфазной)	111
$\mathfrak{P}$	— напряженіе на зажимахъ, дѣйствующее	57
l	— длина пути магнитныхъ линій	2
L	— коэффиціентъ самоиндукціи	1, 15, 56
m	— число фазъ	14

		стр.
M	— коэффиціентъ взаимной индукціи	15, 56
μ	— магнитная проницаемость	2
c_1	— число періодовъ первичнаго тока	9
c_2	— „ „ вторичнаго „	11
w	— число витковъ одной катушки	2
w_1 (w_2)	— число витковъ всѣхъ катушекъ одной фазы	56
W_1	— электрическая мощность	13
W_2	— механическая мощность	13
W_n	— полезная мощность	29
p	— число паръ полюсовъ	9
Q	— потребляемая мощность	29
R	— потери на треніе	29
$\frac{d}{2}$	— радіусъ	15
S	— площадь сѣченія	2
s	— скольженіе $\left(=\frac{\omega_1-\omega_2}{\omega_1}\right)$	11
s'	— скольженіе $\left(=\frac{\omega_2-\omega_1}{\omega_1}\right)$	86
s_1	— скольженіе второго двигателя при каскадномъ включеніи	90
ξ	— коэффиціентъ формы кривой	1
τ	— коэффиціентъ разсѣянія Гейланда	55
n_1	— число оборотовъ поля	9
n_2	— число оборотовъ ротора	11
V	— потери въ мѣди ротора	13
ν	— коэффиціентъ разсѣянія Гопкинсона	55
r	— электрическое сопротивленіе	1
R	— магнитное сопротивленіе	2
ϕ	— потокъ, мгновенное значеніе	1
Φ	— „ амплитуда	1
ω	— ($=2\pi c$) — угловая скорость	1

Алфавитный указатель.